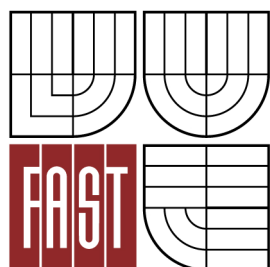




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STAVEBNÍ**  
**ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

# **STUDIE CHOVÁNÍ KONSTRUKCÍ DŘEVĚNÝCH LÁVEK**

BEHAVIOR STUDIES OF THE TIMBER FOOTBRIDGES STRUCTURES

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. PETRA VITÁSKOVÁ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. ROSTISLAV ZÍDEK, Ph.D.**

BRNO 2014



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav stavební mechaniky

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Diplomant</b>	Bc. Petra Vitásková
<b>Název</b>	Studie chování konstrukcí dřevěných lávek
<b>Vedoucí diplomové práce</b>	Ing. Rostislav Zídek, Ph.D.
<b>Datum zadání diplomové práce</b>	31. 3. 2013
<b>Datum odevzdání diplomové práce</b>	17. 1. 2014
V Brně dne 31. 3. 2013	

.....  
prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **Podklady a literatura**

- [1] ČSN EN 1990: Zásady navrhování konstrukcí.
- [2] ČSN EN 1991-1-1-1 Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb.
- [3] ČSN EN 1991-1-1-3 Zatížení konstrukcí – Část 1-3: Obecná zatížení – Zatížení sněhem.
- [4] ČSN EN 1991-1-1-4 Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem.
- [5] ČSN EN 1995-1-1: Navrhování dřevěných konstrukcí, Část 1-1: Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
- [6] ČSN EN 1995-2: Navrhování dřevěných konstrukcí - Část 2: Mosty
- [7] ČSN 73 1702: Navrhování, výpočet a posuzování dřevěných stavebních konstrukcí – Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby

## **Zásady pro vypracování**

Východiskem práce je historická konstrukce dřevěné lávky pro pěší přes řeku Svratku v obci Černvín. Vytvoří se výpočtový model a provede se posouzení hlavních prvků konstrukce. Na to naváže studie statického chování některých soudobých konstrukcí dřevěných lávek pro pěší. Předpokládá se vytvoření a odladění výpočtových modelů a posouzení hlavních nosných prvků. Pro výpočet vnitřních sil a přemístění bude využit vhodný MKP program. Výchozími předpisy pro stanovení zatížení a provedení posudků bude systém Eurokodů [1-6], popřípadě platná norma [7].

## **Předepsané přílohy**

.....  
Ing. Rostislav Zídek, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

## **Abstrakt**

Diplomová práce „Studie chování konstrukcí dřevěných lávek“ se zabývá statickými modely dřevěných mostů a lávek. Práci tvoří především studie chování historického dřevěného mostu v obci Černvín na Vysočině. Na základě skutečné konstrukce je vytvořen prostorový prutový model. Dále jsou navrženy dvě soudobé alternativy řešení dřevěné kryté lávky. Jednotlivé konstrukční prvky jsou posouzeny vzhledem k platným normám. Pro analýzu modelů byl použit MKP program SCIA Engineer 2012.

## **Klíčová slova**

Dřevěná lávka, diagnostika dřevěných konstrukcí, prutový model, věšadlová konstrukce, příhradová konstrukce

## **Abstract**

Master's thesis „Behavioral studies of the timber footbridges structures“ deals with static models of timber footbridges. This thesis mainly consists of the behavioral study of historical timber footbridge in the village of Černvín in Vysočina. Based on the actual design of the bridge a three-dimensional beam model was created. This thesis also includes two contemporary alternatives of timber covered bridges. The individual structural elements were assessed according to the applicable standards. To analyze the model FEM program SCIA Engineer 2012 was used.

## **Keywords**

Timber footbridge, diagnosis of timber structures, beam model, King-post system, truss structure

### **Bibliografická citace VŠKP**

VITÁSKOVÁ, Petra. *Studie chování konstrukcí dřevěných lávek*. Brno, 2013. 37 s., 85 s. příl.  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební  
mechaniky. Vedoucí práce Ing. Rostislav Zídek, Ph.D..

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 17.1.2014

.....  
podpis autora  
Petra Vitásková

## **Poděkování**

Tímto bych chtěla poděkovat panu Ing. Rostislavu Zídkovi, Ph.D. za odborné vedení mé diplomové práce, za jeho trpělivost, ochotu a užitečné rady a paní Ing. Věře Heřmánkové, Ph.D. za konzultace v oblasti diagnostiky dřevěných konstrukcí. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat svým přátelům a rodině za podporu a svým rodičům za to, že mi umožnili tuto vysokou školu studovat.

V Brně dne 17.1.2014

.....

Podpis autora

## OBSAH

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. HISTORICKÝ DŘEVĚNÝ MOST V OBCI ČERNVÍR .....</b>	<b>2</b>
2.1. POPIS KONSTRUKCE.....	2
2.2. PRŮZKUM A DIAGNOSTIKA KONSTRUKCE.....	3
2.3. ZATÍŽENÍ.....	5
2.4. VÝPOČTOVÝ MODEL .....	9
2.4.1. <i>Hlavní trámy a podélníky .....</i>	<i>9</i>
2.4.2. <i>Podvleky, mostiny a spodní pás příhrady.....</i>	<i>10</i>
2.4.3. <i>Sloupy a vzpěry .....</i>	<i>11</i>
2.4.4. <i>Vaznice.....</i>	<i>12</i>
2.4.5. <i>Konstrukce krovu.....</i>	<i>13</i>
2.5. POSTUP MODELOVÁNÍ.....	14
2.6. POSOUZENÍ .....	19
2.6.1. <i>Mezní stav únosnosti .....</i>	<i>19</i>
2.6.2. <i>Mezní stav použitelnosti .....</i>	<i>21</i>
2.7. DYNAMICKÝ VÝPOČET .....	21
2.8. SPOJE.....	22
<b>3. MODERNÍ KONSTRUKCE DŘEVĚNÝCH LÁVEK.....</b>	<b>25</b>
3.1. POPIS KONSTRUKCE.....	25
3.2. ZATÍŽENÍ.....	26
3.3. VÝPOČTOVÝ MODEL .....	27
3.4. POSOUZENÍ .....	29
3.4.1. <i>Mezní stav únosnosti .....</i>	<i>29</i>
3.4.2. <i>Mezní stav použitelnosti .....</i>	<i>31</i>
3.5. DYNAMICKÝ VÝPOČET .....	32
3.6. SPOJE.....	33
<b>4. ZÁVĚR.....</b>	<b>35</b>
<b>5. ZDROJE.....</b>	<b>36</b>
<b>6. SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>37</b>



## 1. ÚVOD

---

Tato diplomová práce se zabývá modelováním a statickými výpočty dřevěných lávek. K tomuto účelu je využito programu SCIA Engineer.

Hlavní část této práce tvoří studie chování historického dřevěného mostu přes řeku Svatku v Obci Černvín na Vysočině. Byl proveden průzkum konstrukce a ověření výkresové dokumentace získané z OÚ Černvín a změřeny chybějící rozměry. Na konstrukci byl proveden diagnostický průzkum nedestruktivními a semi-destruktivními metodami za použití přístrojů zapůjčených Ústavem stavebního zkušebnictví Fakulty stavební, konkrétně přístroji Hygrotest 6500 a Pilodyn 6J. Vyhodnocením naměřených veličin byly získány pevnosti konstrukčních prvků. Na základě rozměrů získaných z výkresové dokumentace a naměřených hodnot byl postupně vytvářen a odlaďován výpočtový model. Práce obsahuje postup modelování a popis výsledného modelu, dále je uvedena přehledná tabulka výsledků obou mezních stavů. Kompletní statický výpočet je obsažen v přílohách. Práce také zmiňuje problematiku vlastních frekvencí u konstrukcí lávek pro pěší. V závěru kapitoly jsou uvedeny výsledky výpočtů některých spojů.

Další část tvoří alternativní varianty řešení zastřešené lávky pro pěší. Inspirací pro vytvoření dvou variant s příhradovým nosným systémem byly lávky Peklo a Ostrovy přes řeku Metuji na Náchodsku. První varianta je tvořena příhradovou konstrukcí s pouze tlačnými vzpěrami, druhá varianta byla vytvořena s větším důrazem na estetiku a její příhradová konstrukce je tvořena poli s trojúhelníkovitě uspořádanými diagonálami, která se směrem od pilíře lineárně zvětšují. Pro obě varianty byl vytvořen výpočtový model a nadimenzovány a posouzeny jednotlivé konstrukční prvky. V práci jsou uvedeny přehledné tabulky dimenzí jednotlivých prvků a také tabulky výsledků posouzení obou mezních stavů. V závěru jsou uvedeny výpočty některých spojů a jsou zmíněny některé moderní spojovací prostředky.

Kompletní statické výpočty obou variant jsou uvedeny ve zvláštních přílohách.

## 2. HISTORICKÝ DŘEVĚNÝ MOST V OBCI ČERNVÍR

### 2.1. Popis konstrukce

Konstrukce krytého dřevěného mostu v obci Černvír přemostující řeku Svatku pochází z roku 1718. Jedná se o nejstarší dochovaný dřevěný most na Moravě. Až do roku 1954 byl tento most využíván silniční dopravou, poté byl postupně nahrazen ocelovým a betonovým mostem, který se nachází jen o pár metrů severně proti proudu řeky Svatky. V dnešní době je pohybu vozidel po konstrukci zabráněno stavebními úpravami.

Celková délka mostu je 34 metrů, světlá šířka 3,2 metru a světlá výška 4,3 metru. Konstrukci tvoří 4 hlavní trámy a 10 podélníků prostě uložených ve dvou polích prostřednictvím pozednic na středním zděném pilíři a dvou krajních podpěrách. Pole jsou nesymetrická, délek 19,9 a 14,5 metru a nejsou přímá (úhel odklonu je tak malý, že pro výpočetní model byl zanedbán a konstrukce je uvažována jako přímá). Nosným systémem konstrukce je věšadlo, které je v západním (Obr. 2. 2) poli (pole délky 19,9 metru) tvořeno dvěma taženými sloupky a čtyřmi vzpěrami a v poli východním (pole délky 14,5 metru) je věšadlo tvořeno jedním taženým sloupkem a dvěma vzpěrami. Pomocí kovaných třmenů jsou věšadly vynášeny příčné podvleky, které podírají podélníky a spolu s mostinami zajišťují spolupůsobení trámů v příčném směru. Mostiny u sloupků jsou prodlouženy a z vnitřní i vnější strany umožňují připojení vzpěrek sloupků, které zajišťují stabilitu věšadel v příčném směru. Konstrukce je z bočních stran (od severu a jihu) chráněna dřevěným bedněním od úrovně hlavního trámu až po úroveň středové vaznice („zábradlí“), tímto je hlavní trám chráněn proti povětrnostním vlivům. Konstrukce je zastřešena jednoduchým hambalkovým krovem, který je zhruba v každé třetí vazbě ztužen v příčném směru Ondřejskými kříži (=šikmý kříž ve tvaru písmene X, na kterém byl podle legendy ukřižován Svatý Ondřej). Tuhost krovu v podélném směru je zajištěna laťováním a dvojitou vrstvou šindelů.



Obr. 2. 1 Krytá lávka v obci Černvír



Obr. 2. 2 Umístění lávky v obci s popisem světových stran

## 2.2. Průzkum a diagnostika konstrukce

Konstrukce mostu prošla v nedávných letech mnoha rekonstrukcemi (Obr. 2. 4). K jedné z posledních rekonstrukcí patří sanace a výměna zhlaví hlavních trámů a některých podélníků (Obr. 2. 3), sanace středního pilíře a opěr, pozednic, výměna mostin a vzpěrek sloupů. K této rekonstrukci byla vytvořena dokumentace, kterou obec Černvír poskytla jako podklad pro vytvoření této diplomové práce. Tato dokumentace byla ověřena a doplněna prohlídkou a měřením přímo na mostě. Dokumentace je uvedena v příloze č. 1.



Obr. 2. 4 Rekonstrukce mostu (12/2008)



Zdroj [1] Obr. 2. 3 Vyměněná zhlaví trámu a podélníků

V projektové dokumentaci však nejsou zaznamenány údaje o materiálových charakteristikách jednotlivých konstrukčních prvků. Vzhledem k povaze projektu bylo přistoupeno ke zhodnocení kvality materiálu dřevěných prvků nedestruktivními a semidestruktivními diagnostickými metodami. Pro měření byly použity tři přístroje zapůjčené Ústavem stavebního zkušebnictví a to přístroj pro měření vlhkosti, Pilodyn a přístroj pro měření šíření ultrazvukových vln.

První a nejrozšířenější diagnostickou metodou stávajících konstrukcí je vizuální hodnocení. Touto metodou lze identifikovat místa s viditelným poškozením a určit zájmová místa pro další průzkum. Dřevo je z hlediska diagnostického hodnocené velmi složitým materiálem, jehož vlastnosti ovlivňuje řada faktorů. Jedním z nejdůležitějších je schopnost dřeva přijímat vodu z okolního prostředí, takový materiál nazýváme hygroskopickým. Proto je nedílnou součástí diagnostiky dřevěných konstrukcí měření aktuální vlhkosti zkoumaného prvku. Měření vlhkosti konstrukce bylo prováděno přístrojem na měření vlhkosti dřeva Hygrotest 6500 (Obr. 2. 5). Přístroj se řadí mezi odporové vlhkoměry. Průměrná hodnota vlhkosti dřevěných prvků se během měření pohybovala okolo 14%. Na přístroji se nastavují dvě veličiny a to aktuální teplota okolního vzduchu a druh dřeva podle přiloženého návodu. Konkrétní výsledky jsou uvedeny v příloze č. 3.



Obr. 2. 5 Hygrotest 6500

Hlavní metodou použitou pro hodnocení kvality jednotlivých konstrukčních prvků byla semi-destruktivní metoda odporového zarážení trnu, konkrétně přístrojem Pilodyn 6J Forest (Obr. 2. 6). Přístroj je jednoduché mechanické zařízení, které měří hloubku průniku trnu do dřeva. Průměr trnu je 2,5mm a maximální hloubka zarážení trnu je 40mm, označení 6J znamená rovnoměrnou práci jakou je trn do dřeva zarážen. Na základě změřené hloubky a vlhkosti prvku lze stanovit hustotu materiálu podle následujících vztahů:

$$\rho_{12} = -0,027102 \cdot t_{p,12} + 0,727987$$

$$t_{p,12} = t_p (1 - 0,007 \cdot \Delta w)$$

$$\Delta w = w - 12$$

$\rho_{12}$  – hustota dřeva při vlhkosti 12% [kg/m<sup>3</sup>]

$t_{p,12}$  – hloubka zarážení trnu do dřeva o vlhkosti 12% [mm]

$t_p$  – naměřená hloubka zarážení trnu [mm]

$w$  – naměřená vlhkost dřeva [%]





Obr. 2. 6 Pilodyn 6J

Z vypočítaných hodnot hustoty jednotlivých prvků lze stanovit pomocí regresní závislosti uvedené v publikaci *Dřevěné konstrukce* <sup>[2]</sup> pevnost prvku v ohybu  $f_m$ . Byl použit vzorec pro výpočet 5% kvantilu pevnosti v ohybu:

$$f_m = 0,155 \cdot \rho_{12} - 35,5$$

Výsledné hodnoty stanovené tímto postupem jsou uvedeny v následující tabulce:

Prvek	materiál	$\rho_{12}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_m$	Třída
Nosné trámy a podélníky	jedle	325	14,82	C14
Podvlek	dub	376	22,78	D18
Vaznice	jedle	356	19,68	C20
Vaznice střední	jedle	276	7,28	C14
Sloupy	jedle	265	5,58	C14
Vzpěry	jedle	294	10,07	C14
Mostovka	modřín	379	23,25	C22

Tab 2. 1 Hodnoty naměřené přístrojem Pilodyn 6J

Na konstrukci proběhlo také měření rychlosti šíření ultrazvukových vln přístrojem Tico, tímto postupem můžeme sledovat místa s odlišnými hodnotami rychlosti šíření ultrazvukových vln a na základě těchto hodnot určit místa, kde prvek vykazuje vnitřní vady (dutiny, trhliny, suky), v poškozeném místě je doba průchodu vlny delší než ve zdravém dřevě. Touto metodou však nelze stanovit pevnost materiálu.

### 2.3. Zatížení

Most je modelován jako prutová konstrukce a veškeré zatížení (kromě vlastní tíhy) je aplikováno liniově na jednotlivé pruty. Na konstrukci bylo uvažováno s vlastní tíhou, ostatním stálým zatížením, nahodilým zatížením a klimatickým zatížením. Ostatní stálé zatížení je tvořeno tíhou střešního pláště, tedy laťováním a dvojitou vrstvou šindelů. Nahodilé zatížení je uvažováno jako zatížení davem na mostní konstrukci, zatížení dopravou nebylo vzhledem k zamezení automobilové dopravy na mostě uvažováno. Klimatické zatížení tvoří zatížení větrem a sněhem. Ačkoli se běžně na mostní konstrukce zatížení sněhem neuvažuje z důvodu pravidelného odklizení sněhu kvůli dopravě, v tomto případě je třeba počítat se zatížením sněhem na konstrukci zastřešení. Vyšetřovanou konstrukcí je krytý most. Při zatížení sněhem jsou uvažovány tři situace, plný sníh, sníh levý s poloviční hodnotou na pravé straně a sníh pravý s poloviční hodnotou na levé straně. U zatížení větrem jsou uvažovány 4 stavy, z toho 3 stavy pro příčný a jeden pro podélný vítr. Tyto zatěžovací

stavy jsou vytvořeny dle normy ČSN EN 1990-1-4<sup>[3]</sup>. V jednom zatěžovacím stavu lze uvažovat na jedné straně střechy vždy jen jeden účinek (sání nebo tlak). Z toho vyplývají 4 zatěžovací stavy pro příčný vítr a jeden pro vítr podélný. Pro střechu sklonu 45° jsou součinitele vnějšího tlaku  $c_{pe,10}$  uvedeny v následujících tabulkách:

	G	H	I	J	
45°	0,0	0,0	-0,2	-0,3	sání
	0,7	0,6	0,0	0,0	tlak

Tab 2. 2 Součinitel  $c_{pe,10}$  pro příčný vítr

	F	G	H	I
45°	-1,1	-1,4	-0,9	-0,5

Tab 2. 3 Součinitel  $c_{pe,10}$  pro podélný vítr

Lávka se nachází ve IV. sněhové a III. větrové oblasti, je uvažována III. kategorie terénu.

Charakteristické hodnoty zatížení:

Vlastní tíha	generováno programem
Ostatní stálé zatížení	$g_1=0,30 \text{ kN/m}^2$
Nahodilé zatížení	$q_1=5 \text{ kN/m}^2$
Sníh	$s_k=0,8 \text{ kN/m}^2$ (včetně součinitele tvaru střechy)
Vítr	$q_p=0,626 \text{ kN/m}^2$ (bez součinitele vnějšího tlaku)

Výpočet zatížení je uveden v příloze č. 2.

Nahodilé zatížení je umístěno na podélníky a středovou vaznici, zatížení příčným větrem na bednění mostu je aplikováno na středovou vaznici a hlavní trám, všechna ostatní zatížení jsou umístěna na krokve.

V programu SCIA Engineer bylo vytvořeno následujících 10 zatěžovacích stavů (LC - load case):

LC1	Vlastní tíha	
LC2	Ostatní stálé zatížení	(Obr. 2. 7)
LC3	Nahodilé	(Obr. 2. 8)
LC4	Vítr příčný – sání zprava	(Obr. 2. 9)
LC5	Vítr příčný – tlak zleva	
LC6	Vítr příčný – tlak zleva + sání zprava	(Obr. 2. 10)
LC7	Vítr podélný	
LC8	Sníh plný	(Obr. 2. 11)
LC9	Sníh pravý	(Obr. 2. 12)
LC10	Sníh levý	

Pro zatěžovací stavy LC4 až LC7 a zatěžovací stavy LC8 až LC10 je pro *Skupinu zatížení* v nastavení zvolena funkce *výběrová*, což znamená, že z obou těchto skupin může být do kombinace vždy uvažována pouze jedna z nich.

Kombinace jednotlivých zatěžovacích stavů jsou provedeny dle normy ČSN EN 1990<sup>[5]</sup>:

$$\text{MSÚ} \quad 6.10.a \quad \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$$6.10.b \quad \sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

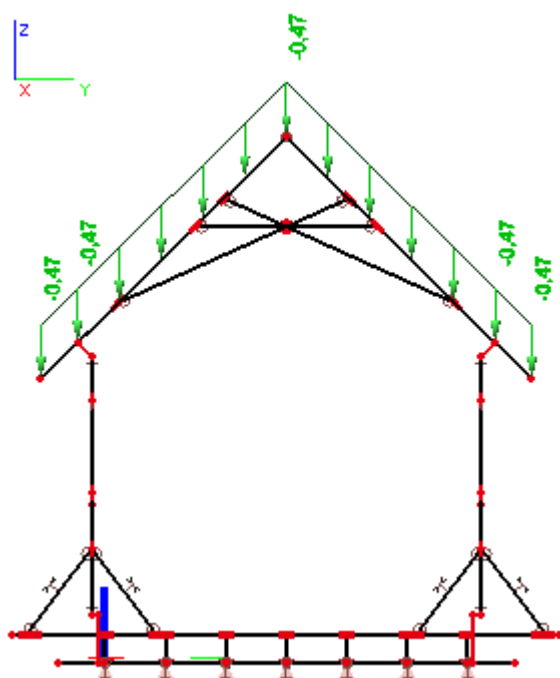
$$\text{MSP} \quad 6.14.b \quad \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Součinitele zatížení

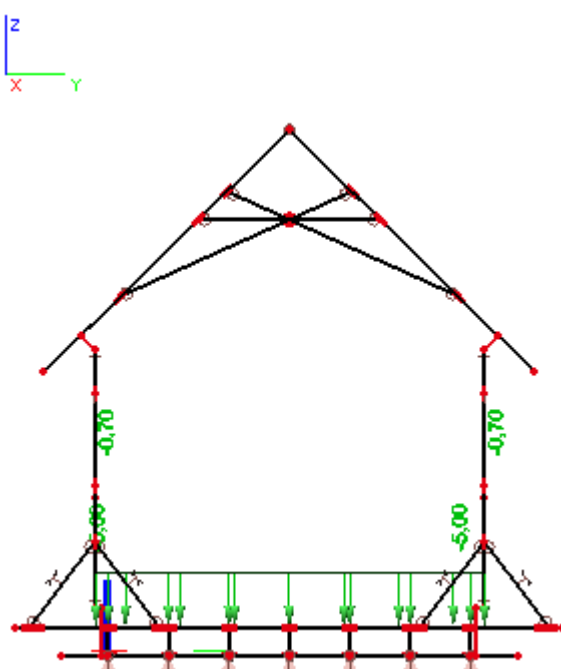
$\gamma_G$	=1,00	příznivé účinky
	=1,35	nepríznivé účinky
$\gamma_Q$	=0,00	příznivé účinky
	=1,50	nepríznivé účinky

Kombinační součinitele

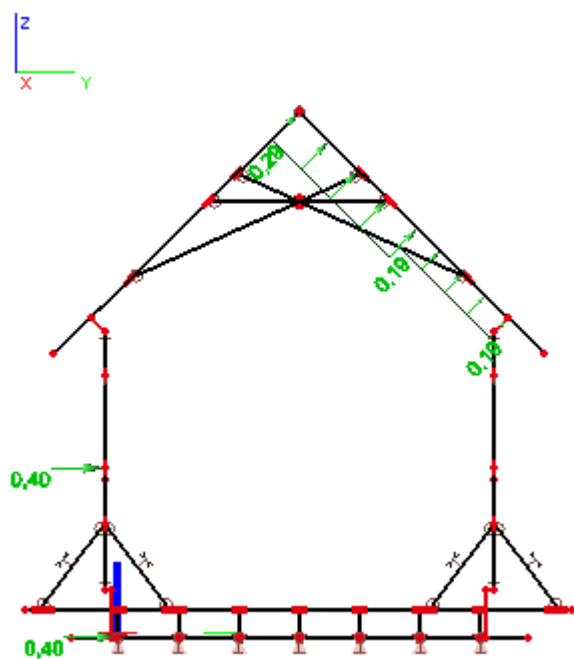
$\psi_0$	=0,7	dopravní plochy
	=0,6	zatížení větrem
	=0,5	zatížení sněhem



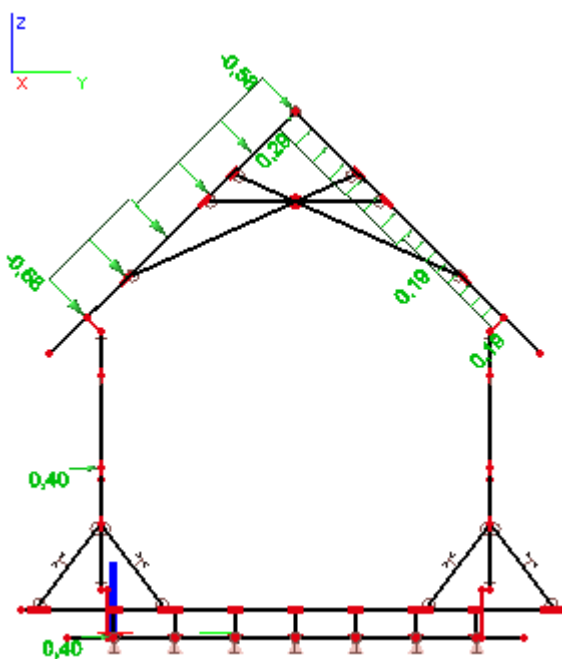
Obr. 2. 7 LC2 - Ostatní stálé zatížení  $g_1=0,3 \text{ kN/m}^2$



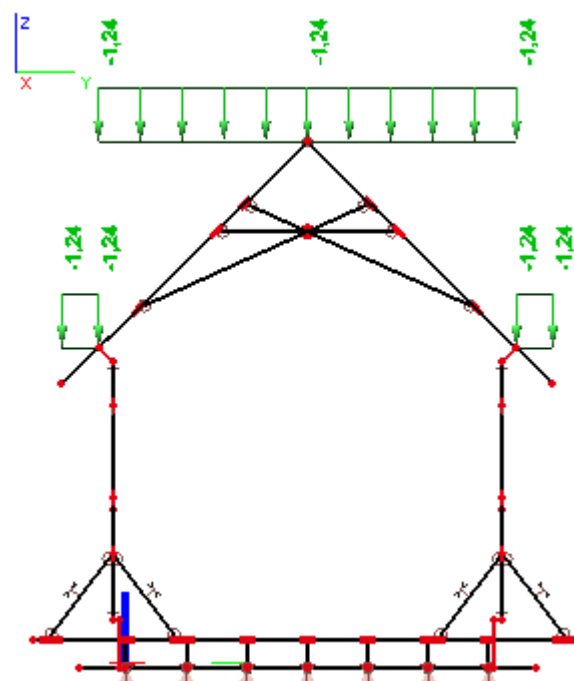
Obr. 2. 8 LC3 Zatížení davem  $q_1=5 \text{ kN/m}^2$



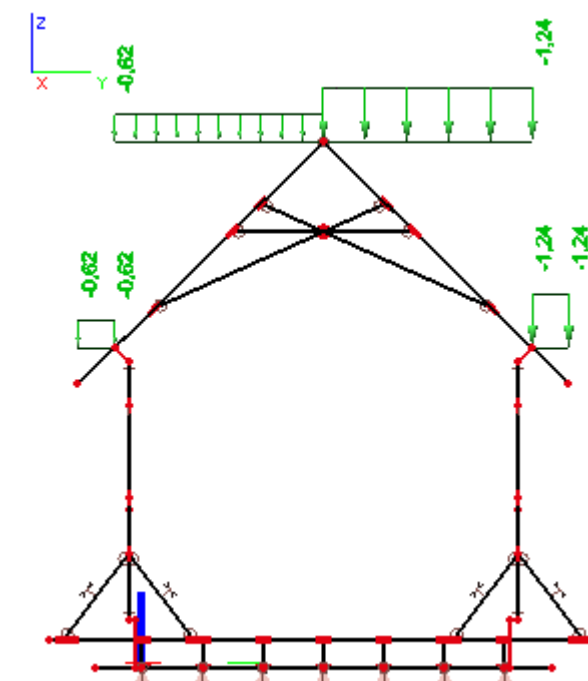
Obr. 2. 9 LC4 Zatížení větrem - sání  $q_p=0,626 \text{ kN/m}^2$



Obr. 2. 10 LC6 Zatížení větrem - sání a tlak  
 $q_p=0,626 \text{ kN/m}^2$



Obr. 2. 11 LC8 Zatížení plným sněhem  $s_k=0,8 \text{ kN/m}^2$

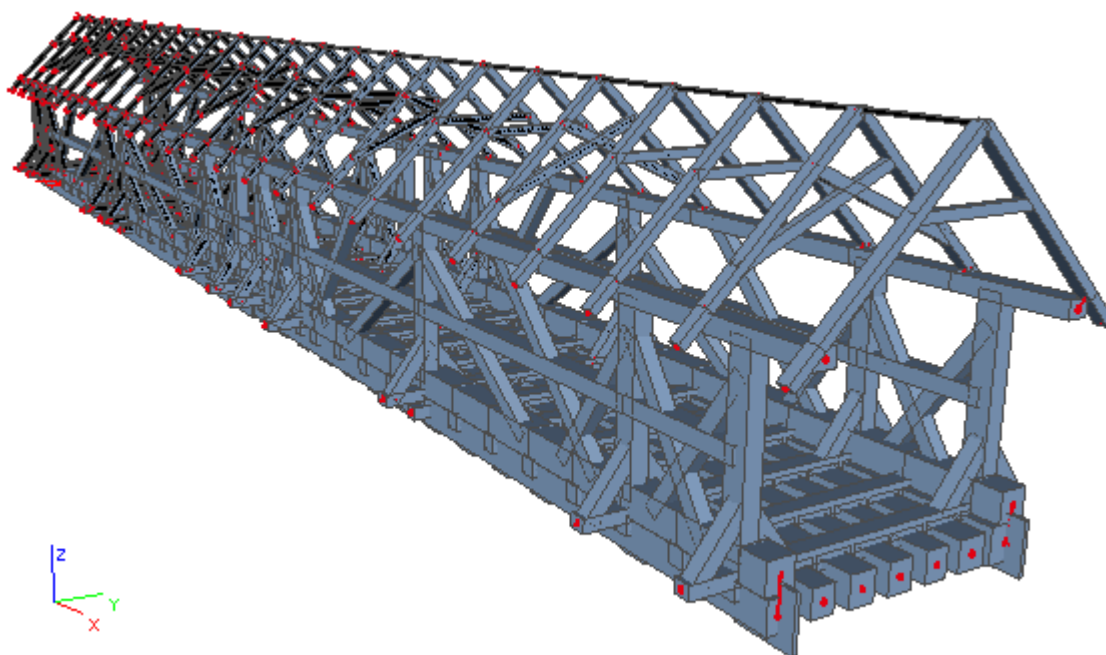


Obr. 2. 12 LC9 Zatížení pravým sněhem  $s_k=0,8 \text{ kN/m}^2$



## 2.4. Výpočtový model

Konstrukce mostu je modelována jako prostorový prutový model (Obr. 2. 13). Jelikož se jedná o konstrukci dřevěnou (tesařskou), jsou spoje modelovány jako kloubové. Pro některé detaily konstrukce bylo třeba využít rozšířeného modelování a to v případech, kdy bylo nutno vyloučit některé modelované prvky z tahu (např. šikmé prvky nosné konstrukce), v místech křížení (např. mezi středovou vaznicí a vzpěrami) nebo v místech, kdy bylo nutné zavést do modelu tuhá ramena.



Obr. 2. 13 Model mostu

### 2.4.1. Hlavní trámy a podélníky

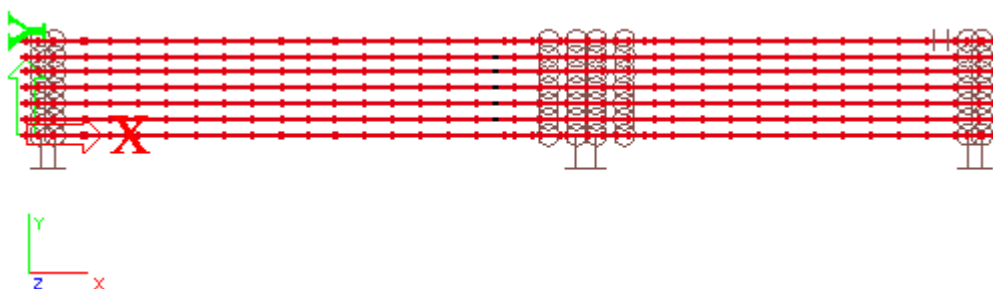
Hlavní trámy a podélníky jsou uloženy pomocí dubových pozednic na střední zděný pilíř (Obr. 2. 14) a dvě krajní opěry, z nichž podpěra v západním poli je tvořena skálou. Spodní stavba nebyla v rámci této práce řešena. Podepření bylo zvoleno v úrovni pozednic a bylo modelováno jako podepření bodové. Rozměry jednotlivých hlavních trámů a podélníků byly na místě změřeny, proto jsou do výpočtu zadány přesně. Pevnost byla brána jako průměrná z měření všech prvků.



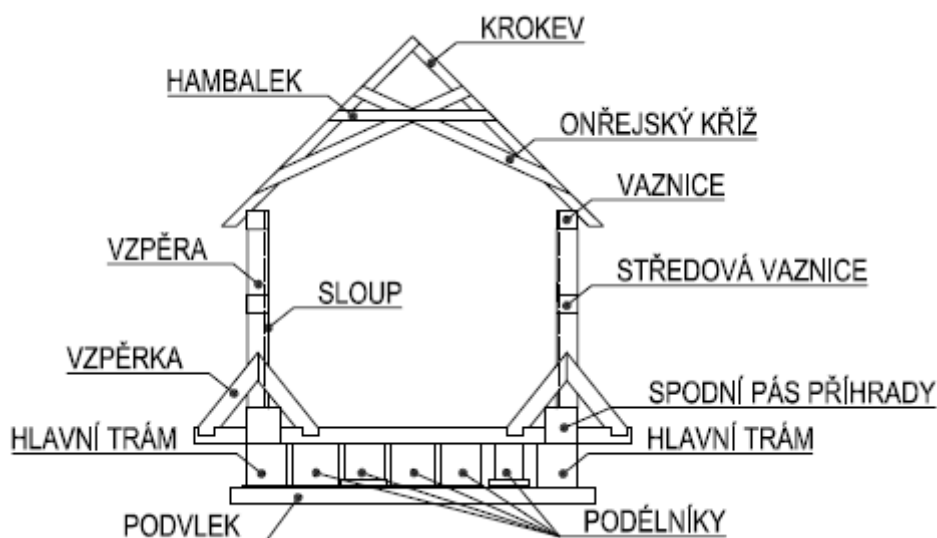
Obr. 2. 14 Uložení hlavních trámů a podélníků na střední zděný pilíř (východní pole)



Obr. 2. 15 Uložení podvleků



Obr. 2. 16 Model uložení



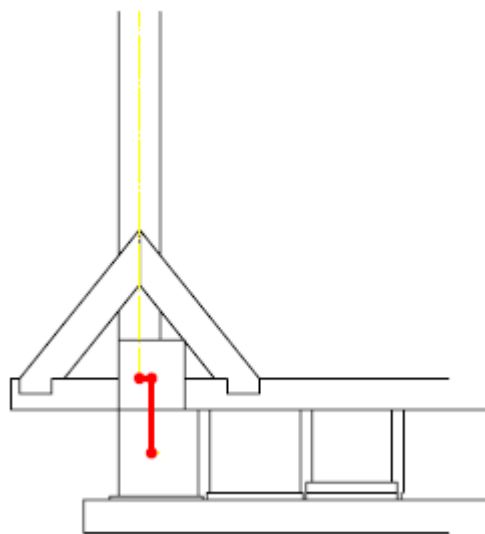
Obr. 2. 17 Schéma jednotlivých prvků konstrukce s popisem

#### 2.4.2. Podvleky, mostiny a spodní pás příhrady

Na hlavním trámu je v podélném směru excentricky uložen druhý trám, do kterého jsou dále začepovány sloupky a vzpěry. Excentrické uložení trámu bylo modelováno pomocí tuhých ramen, kdy vodorovná excentricita je modelována jako velmi tuhý nosník, na jehož konci je řídicí uzel tuhého ramena a svislá část je samotné tuhé rameno, jehož závislý uzel je na úrovni osy excentricky uloženého trámu.

Podvleky jsou příčné prvky vyskytující se v konstrukci pod taženými sloupy (Obr. 2. 15), kde pomocí kovaných třmenů pomáhají přenášet tahové síly ze sloupu a zajišťují tak funkčnost celého nosného systému – věšadla. Podvleky spolu s mostinami zajišťují spolupůsobení podélníků v příčném směru.

Mostiny jsou prvky uložené na hlavních trámech a podélnících a tvoří pochozí vrstvu konstrukce. S konstrukcí nejsou pevně spojeny, jsou pouze položeny na podélnících a hlavních trámech, tuto skutečnost bylo nutné zavést do výpočtového modelu. Mostiny jsou modelovány jedním zástupným



Obr. 2. 18 Vyznačení tuhých ramen pro napojení trámu a sloupu

prvkem na cca 1 metr délky konstrukce a s podélníky a hlavními trámy jsou osově spojeny velmi tuhým prutem, který byl vyloučen z tahu, čímž se model přibližuje skutečnému chování konstrukce.



Obr. 2. 20 Třmeny zajišťující spolupůsobení podvleku s podélníky

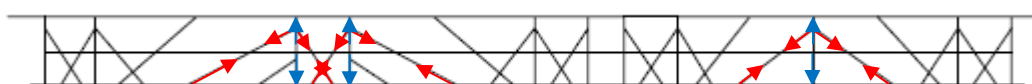


Obr. 2. 19 Mostiny

### 2.4.3. Sloupy a vzpěry

Sloupy a vzpěry tvoří důležitou součást nosného systému konstrukce – věšadla. Na této nosné funkci se podílí však jen část prvků. Zbývající prvky vynášejí konstrukci zastřešení a fungují jako zavětrování konstrukce v podélném směru.

Sloupy a vzpěry jsou na svých koncích zapuštěny do spodního pásu příhrady a začepovány do vaznice. Tyto tesařské spoje však jsou schopny přenést tahové namáhání jen ve velmi omezené míře, této skutečnosti byl přizpůsoben výpočtový model. Všechny prvky, které podle lineární analýzy konstrukce vycházejí tažené, ale z důvodů tesařských spojů nejsou schopny tento tah přenášet, byly vyloučeny z tahového namáhání a byl zaveden nelineární výpočet konstrukce zohledňující tyto podmínky. Výjimku tvoří sloupy, které jsou součástí věšadla a jsou kovanými třemeny připojeny k podvlekům.



Obr. 2. 23 Síly ve věšadle



Obr. 2. 21 Uložení vzpěrek na prodloužené mostiny a jejich ochrana proti povětrnostním podmínkám



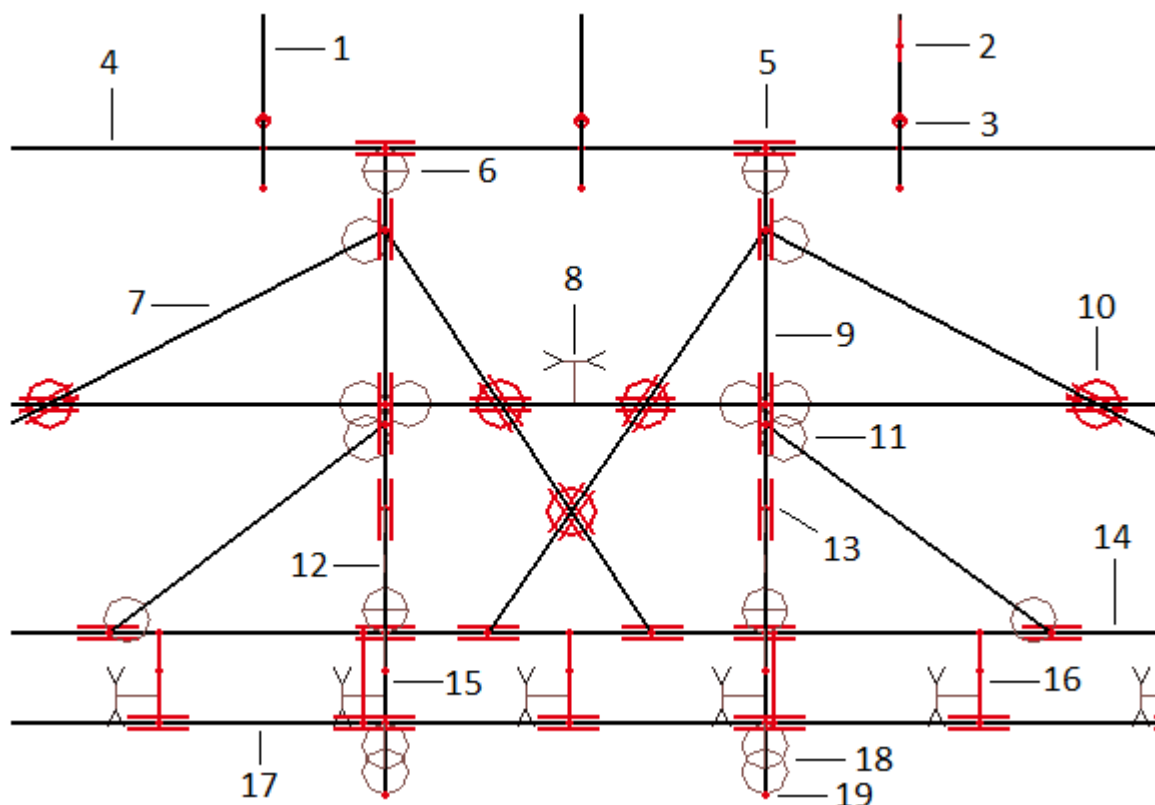
Obr. 2. 22 Napojení sloupů, vzpěr a středové vaznice



V příčném směru jsou sloupky podporovány vzpěrkami, které v tomto směru zajišťují stabilitu konstrukce. Vzpěrky jsou zapuštěny do prodloužené mostiny a přeplátované ve styku se sloupem. Vzhledem k tesařskému spoji byly tyto prvky opět vyloučeny z tahu.

#### 2.4.4. Vaznice

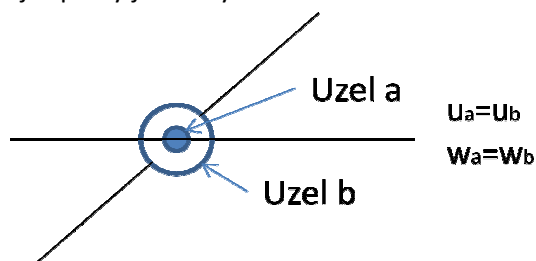
Vaznice je vodorovný prvek, který ztužuje konstrukci v podélném směru a na kterém je vynesena konstrukce zastřešení. Vaznice jsou jedny z původních prvků konstrukce staré cca 300 let. Vaznice je tvořena jedním, nepřerušným kusem na celou délku pole.



Obr. 2. 24 Model věšadla v západním poli

1. Krokev
2. Napojení Ondřejského kříže na krokev
3. Připojení krokve na vaznici - závislý uzel tuhého ramene
4. Vaznice
5. Uzel vytvořený programem SCIA Engineer
6. Kloubové uložení sloupu – volná pootočení  $f_{ix}$  a  $f_{iy}$
7. Vzpěra
8. Symbol pro vyloučení prvku z tahu
9. Sloup
10. Symbol pro kloubové křížení
11. Kloubové spojení vzpěry a sloupu – volné pootočení  $f_{iy}$
12. Vzpěrka
13. Kloubové připojení vzpěrky na sloup – volné pootočení  $f_{iy}$
14. Spodní pás příhrady
15. Velmi tuhý prut pro připojení mostin k podélníkům a hlavním trámům
16. Tuhé rameno – propojení hlavního trámu a spodního pásu příhrady
17. Hlavní trám
18. Velmi tuhý prut pro připojení podvleku k podélníkům a hlavnímu trámu

Zhruba v polovině sloupů se vyskytuje podobný prvek, který byl nazván středová vaznice nebo také zábradlí. Středová vaznice je vždy vsazena mezi dva sloupky, do kterých je začepována, a v místech křížení se vzpěrami jsou prvky přeplátovány. Tento spoj byl v programu modelován jako kloubové křížení. Kloubové křížení simuluje dva klouby – jeden na každém prvku – jeden kloub vnitřní a jeden vnější. Tyto klouby dovolují prvkům libovolné natočení, ale zabezpečují stejné posuny. Oba procházející prvky jsou ohybově tuhé.



Obr. 2. 25 Křížení

#### 2.4.5. Konstrukce krovu

Konstrukci krovu tvoří krokve, hambalky a Ondřejské kříže. Spojení krokve a vaznice je tvořeno tradičně osedláním zhruba do třetiny průřezu krokve. Jelikož prvky na sebe navažují osově, bylo zvoleno modelování pomocí tuhého ramene (Obr. 2. 28), jehož řídicí uzel je zvolen v ose vaznice a uzel závislý v místě, kde se reálně spojující prvky stýkají. Kloubové uložení krokve na vaznici je modelováno kloubem v závislém uzlu tuhého ramene.

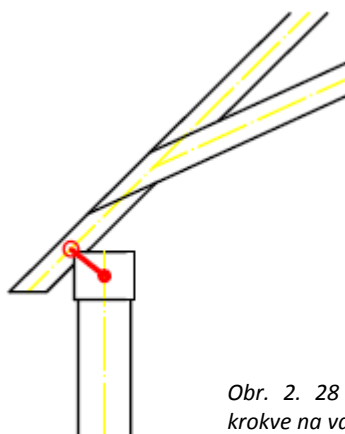


Obr. 2. 26 Kolík a přeplátování ve vrcholu krovu



Obr. 2. 27 Pohled dovnitř lávky

Jednotlivé příčné vazby jsou tvořeny hambalky a v cca každé třetí vazbě je krov ztužen tzv. Ondřejskými kříži. Hambalky jsou tvořeny jednoduchým průřezem a ke krokvím jsou připojeny pomocí přeplátování a kolíků. Ondřejské kříže jsou rovněž tvořeny jednoduchými průřezy a jsou vzájemně přeplátovány do tvaru písmene X. Připojení ke krokvi je stejné jako u hambalku.

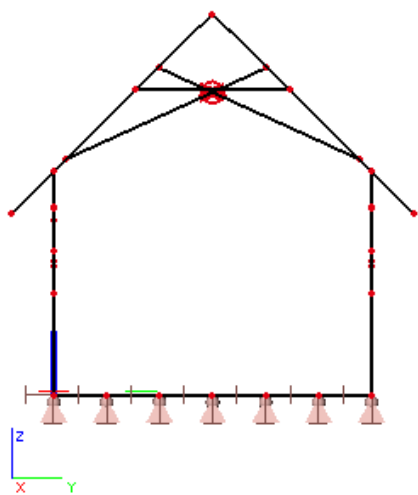


Obr. 2. 28 Tuhé rameno v napojení krokve na vaznici

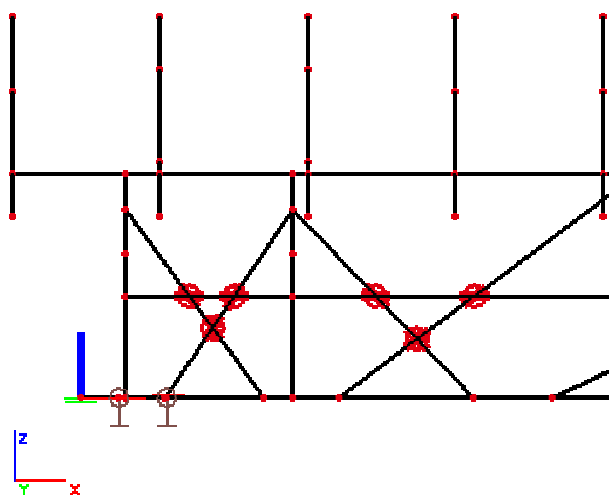
## 2.5. Postup modelování

Výpočtový model by měl splňovat dvě podmínky – co nejlépe vystihnout chování konstrukce a zároveň být co nejjednodušší. Geneze takového modelu probíhala v mnoha krocích od nejjednoduššího modelu po model, který se blíží splnění obou podmínek.

První model je zjednodušením do několika hlavních nosných prvků – hlavní trámy, podélníky, podvleky, sloupy, vzpěry, vaznice, středová vaznice a konstrukce zastřešení. Sloupy a vzpěry jsou v tomto případě uloženy přímo na hlavní trám, byla vynechána konstrukce mostovky a vzpěrky sloupů. Zatížení na konstrukci bylo voleno pouze svislé.

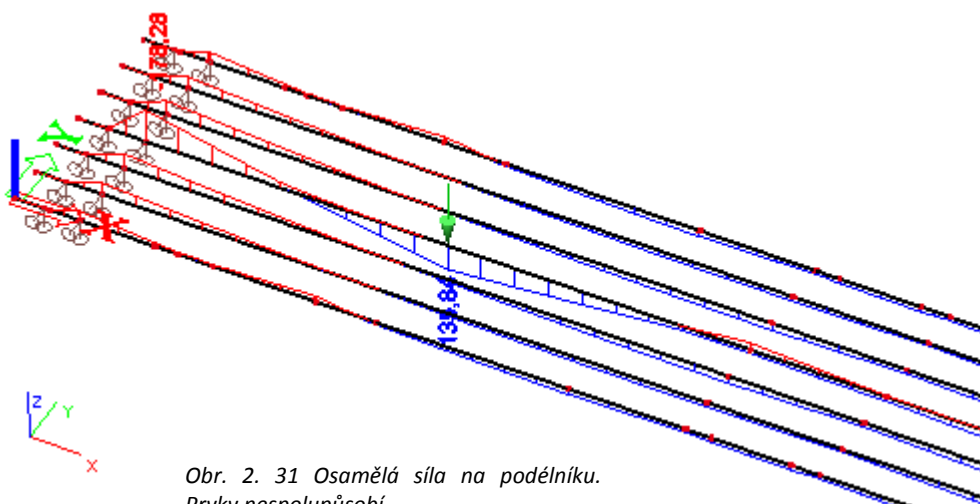


Obr. 2. 29 Zjednodušený model č. 1. Příčný řez.



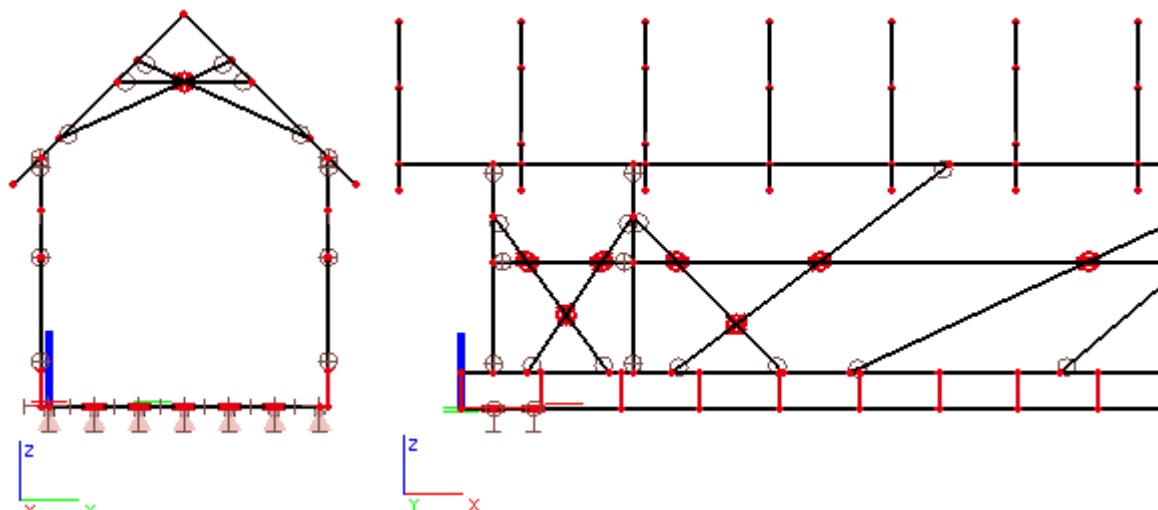
Obr. 2. 30 Zjednodušený model č. 1. Podélný řez.

Na první pohled v tomto modelu chybí klouby na koncích jednotlivých prvků, díky tomu je model tužší, ale velmi nepřesný pro popis reálného chování konstrukce. Dále zcela chybí konstrukce mostovky což se projeví při zatížení konstrukce osamělou silou na podélník, osamělá síla způsobí na daném podélníku značný ohybový moment, ale v globálním účinku konstrukci nijak neovlivní. V reálu však podélníky spolupůsobí pomocí mostin, které jsou na nich uloženy. Dále je patrná absence příčného ztužení konstrukce, které v tomto modelu tvoří pouze Ondřejské kříže. Podvleky jsou připojeny k podélníkům a hlavním trámům pomocí tuhých uzelů. Tento model je velmi zjednodušený a pro posuzování konstrukce není vhodný.



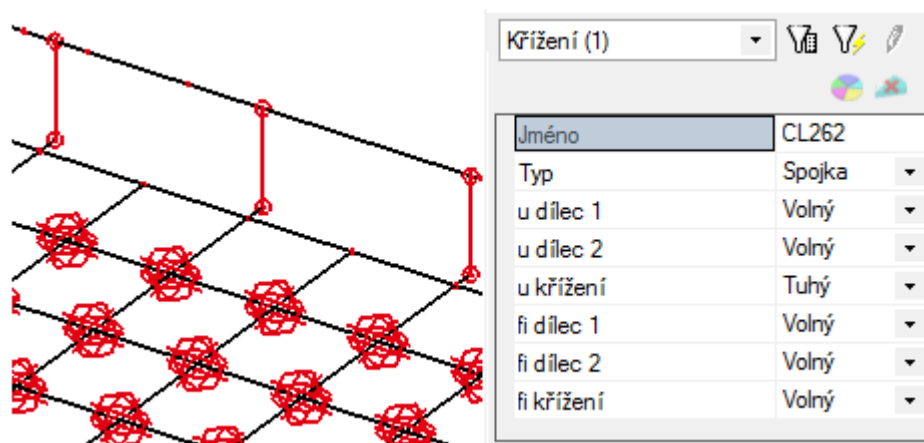
Obr. 2. 31 Osamělá síla na podélníku.  
Prvky nespolečně působí.

Druhý model byl doplněn o klouby na koncích prutů a trám nazvaný spodní pás příhrady. Spodní pás příhrady je na hlavním nosníku uložen excentricky, což bylo modelováno velmi tuhým krátkým vodorovným prutem délky 70mm, na který bylo následně modelováno tuhé rameno s řídícím uzlem na konci tuhého prutu a závislým uzlem na spodním pásu příhrady (v ose prutu). Další úpravou je připojení podvělků k podélníkům a hlavním trámům kloubovým křížením.



Obr. 2. 33 Zjednodušený model č. 2. Příčný řez  
Obr. 2. 32 Zjednodušený model č. 2. Podélný řez

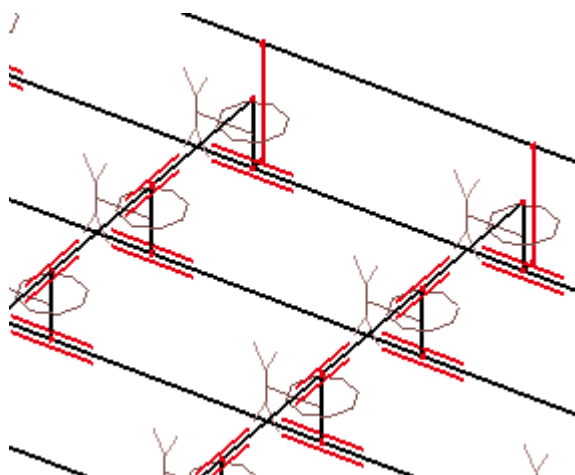
Ve třetím modelu byly přidány mostiny. V tomto kroku byly mostiny připojeny přímo na podélníky a hlavní trámy pomocí tzv. spojky. Spojka umožňuje modelovat pootočení a posuny jednotlivých částí křížení a také pootočení a posun křížení jako celku. V tomto případě bylo vše, kromě posunu celého křížení nastaveno jako volné (za předpokladu, že jsou mostiny přichyceny k podélníkům po půl metru hřebíky).



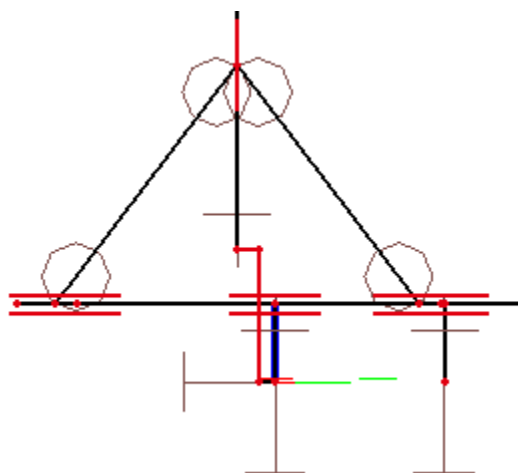
Obr. 2. 34 Připojení mostin na podélníky spojkami

Tato teorie však po důkladném prozkoumání konstrukce musela být přehodnocena. Mostiny nejsou k podélníkům přibity hřebíky, ale jsou jen volně položeny. To bylo ve čtvrtém modelu vyřešeno napojením mostin na podélníky a hlavní trámy pomocí velmi tuhých prutů, které byly následně vyloučeny z tahu, aby model co nejvíce odpovídal skutečnému uložení mostin. Dále bylo vyřešeno ztužení konstrukce v příčném směru přidáním vzpěrek. Byla vzata v úvahu excentricita

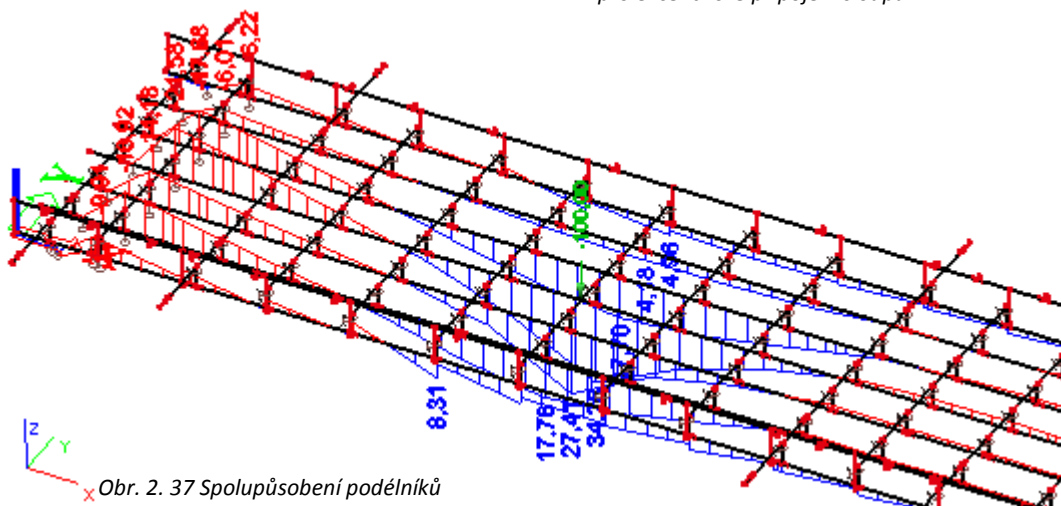
uložení sloupů a vzpěr na spodní pás příhrady, tuhé rameno má řídicí uzel v ose spodního pásu příhrady a závislý uzel v ose připojovaného sloupu nebo vzpěry.



Obr. 2. 36 Napojení mostin pomocí velmi tuhých prutů

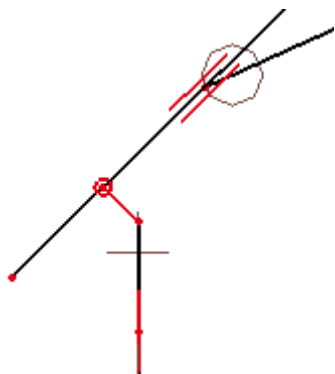


Obr. 2. 35 Doplnění modelu o vzpěrky a tuhé rameno pro excentrické připojení sloupu

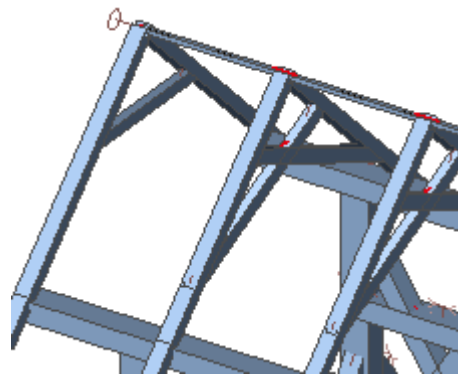


Obr. 2. 37 Spolupůsobení podélníků

Dále bylo využito tuhých ramen pro napojení krokve na vaznici. Řídící uzel je modelován v ose vaznice, závislý uzel v ose krokve. Uzel v ose krokve je modelován jako kloubový, a aby se z konstrukce nestal mechanismus, byla do vrcholu konstrukce zastřešení vymodelována lať, která simuluje funkci laťování a střešní krytiny, tedy ztužení střešní konstrukce v podélném směru.

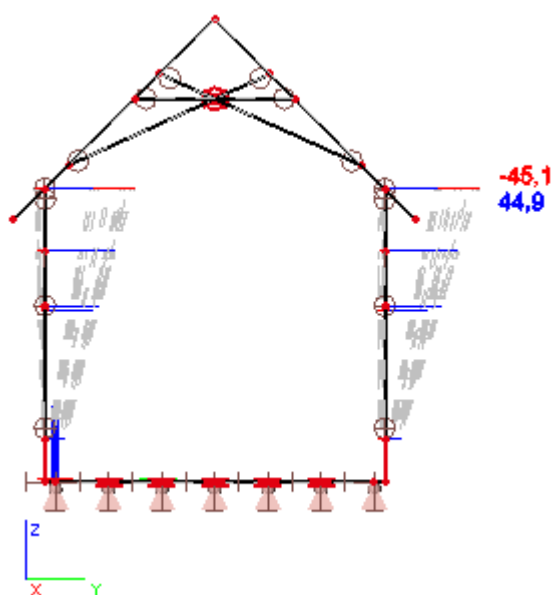


Obr. 2. 38 Uložení krokve na vaznici pomocí tuhého ramene s kloubem

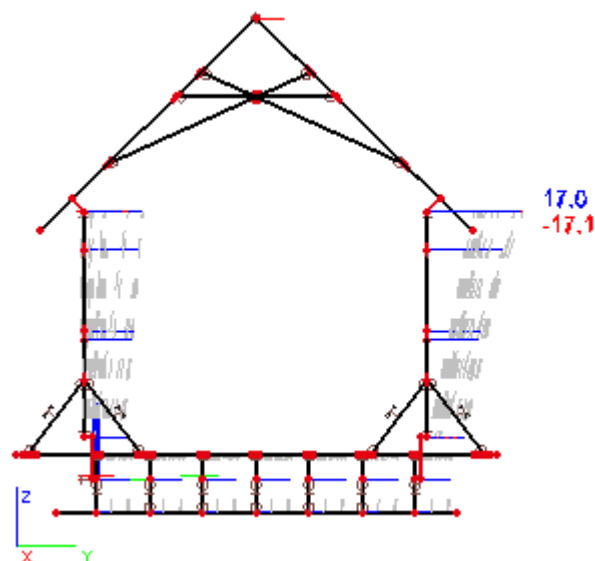


Obr. 2. 39 Vrcholová lať průřezu 50x50mm



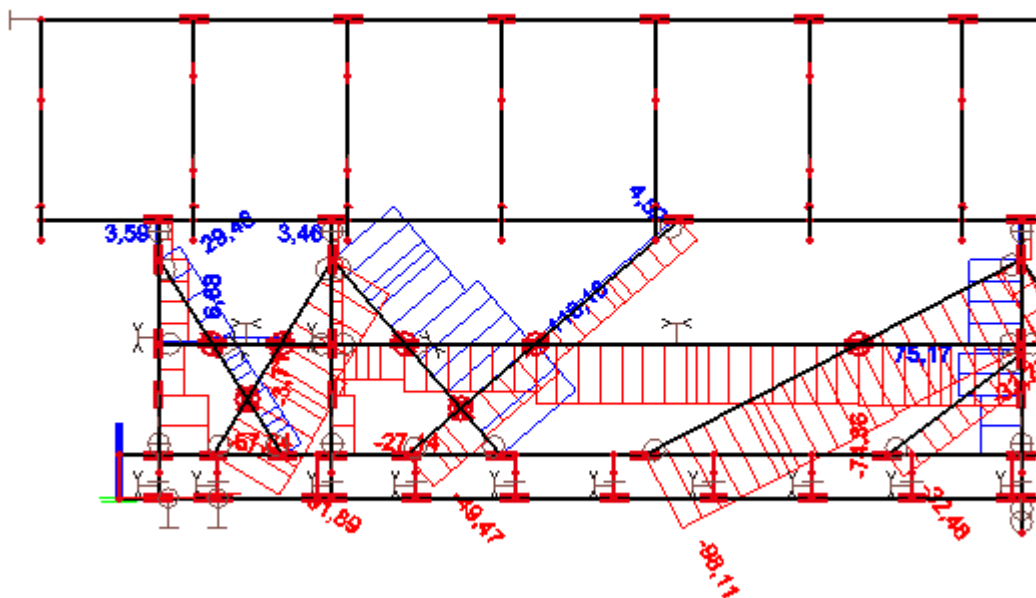


Obr. 2. 40 Deformace  $u_y$  pro model bez příčného ztužení vzpěrkami



Obr. 2. 41 Deformace  $u_y$  pro model s příčným ztužením  
vzpěrkami

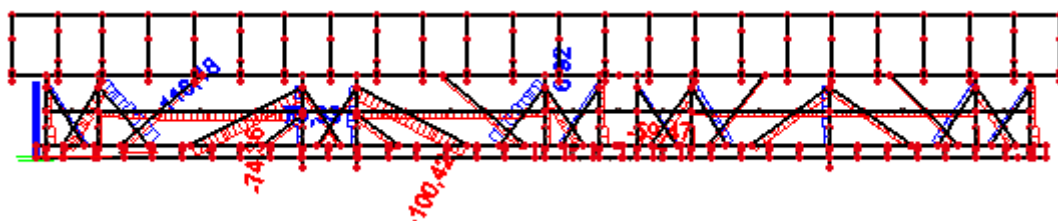
Ve finálním modelu bylo zohledněno vzájemné připojení jednotlivých konstrukčních prvků. Při prohlídce mostu bylo patrné, že většina spojů je původních – tesařských, a během rekonstrukcí byla snaha o zachování původního rázu konstrukce. Výjimečně jsou k vidění kované hřebíky. Vzhledem k tomu, že tesařské spoje jako jsou zapuštění, čepy a přeplátování nepřenese tahové namáhání, bylo využito nelineárního vyloučení z tahu některých prvků.



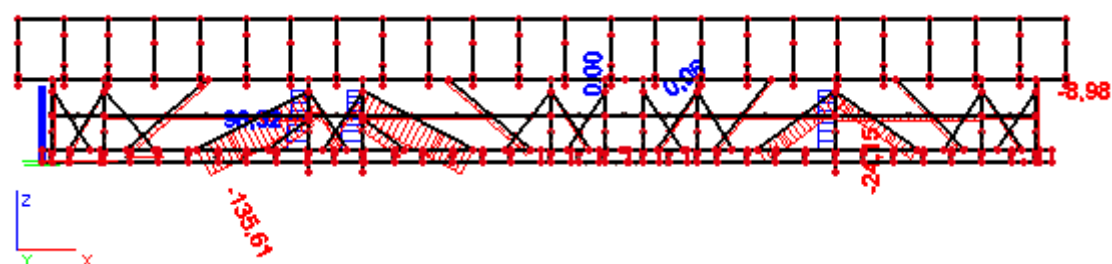
Obr. 2. 42 Příklad prvků, které byly na základě lineárního výpočtu vyloučeny z tahu – tažené diagonály

Vyloučení z tahu se týká především šikmých prvků, označovaných jako vzpěry (Obr. 2. 42). Jedná se o prvky, které nejsou součástí nosného systému věšadla, ale chovají se více jako diagonály příhradové konstrukce. Dále byly vyloučeny z tahu sloupy nad podporami, které také nejsou součástí věšadla, ale vynášejí konstrukci střechy, středová vaznice („zábradlí“), vzpěrky a tuhé pruty vynášející mostovku.

Poslední úpravou v modelu byla změna uložení podvleků, ty byly modelovány podobně jako mostiny připojením pomocí velmi tuhých prutů s klouby na obou koncích. Tyto prvky na rozdíl od připojení mostin nebyly vyloučeny z tahu, protože jsou pomocí kovaných pásků spojeny s podélníky.



Obr. 2. 43 Průběh normálových sil v konstrukci spočítané lineárním výpočtem



Obr. 2. 44 Průběh normálových sil v konstrukci spočítané nelineárním výpočtem

Existují různé typy nelinearit v konstrukci. Jedná se o fyzikální nelinearity, které souvisí s vlastnostmi materiálu (nelineární pružnost, plasticita, lomová mechanika), dále geometrická nelinearita (velké deformace) a konstrukční nelinearita, do které spadají například jednostranné vazby nebo jako v tomto případě prvky působící pouze v tlaku (tahu). Narazí-li program při výpočtu na tažený prvek, který je označen jako vyloučený z tahu, chová se, jako by tam tažený prvek vůbec nebyl a síly se přerozdělí do okolní konstrukce.

Pro nelineární výpočet je třeba sestavit nelineární kombinace zatížení. Tyto kombinace nelze zadat pomocí obálek, to znamená, že program nevytvoří kombinace automaticky, tak jako u lineárního výpočtu, ale je třeba je vytvořit ručně. V tomto případě bylo vytvořeno několik nelineárních kombinací podle vzorců 6.10.a) a 6.10.b) normy ČSN EN 1990<sup>[5]</sup>. Ze zatěžovacích stavů byly brány v úvahu následující:

- LC1 Vlastní tíha
- LC2 Ostatní stálé zatížení
- LC3 Nahodilé
- LC5 Vítr příčný – tlak zleva
- LC6 Vítr příčný – tlak zleva + sání zprava
- LC8 Sníh plný
- LC10 Sníh levý

Kombinace pro mezní stav únosnosti s největším účinkem je nelineární kombinace NC5 sestavená podle vzorce 6.10.b):

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$$1,35 \cdot 0,85 \cdot (LC1 + LC2) + 1,5 \cdot LC3 + 1,5 \cdot (0,6 \cdot LC6 + 0,5 \cdot LC10)$$

Kombinace s největším účinkem pro mezní stav použitelnosti je kombinace NC8 –MSP podle vzorce 6.14.b):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$$LC1 + LC2 + LC3 + 0,6 \cdot LC6 + 0,5 \cdot LC10$$

## 2.6. Posouzení

Vstupními informacemi pro statický výpočet jsou průřezové a materiálové charakteristiky. Rozměry konstrukčních prvků byly částečně převzaty z dokumentace uvedené v příloze č. 1, a z větší části byly změřeny přímo na místě vhodnými měřicími prostředky. Materiálové charakteristiky byly rovněž měřeny přímo na místě a hodnoty pro měřené konstrukční prvky jsou uvedeny v kapitole 2.2 Průzkum a diagnostika konstrukce, Tab 2. 1. Pro výpočet byly použity hodnoty 5% kvantilu pevnosti (tzv. charakteristické hodnoty). U některých prvků mohou však být tyto hodnoty zavádějící. Například sloupy, vzpěry a vaznice jsou z velké části tvořeny původními prvky a dřevo na povrchu vykazuje znaky degradace, je zvětřelé a silně porézní. Proto měření povrchovou metodou nemusí ukazovat na jeho skutečné vlastnosti. Vypočítaným pevnostem byla dle normy ČSN EN 338 <sup>[6]</sup> přiřazena pevnostní třída.

### 2.6.1. Mezní stav únosnosti

Ačkoli program SCIA Engineer od verze 2012 umí provádět posouzení dřevěných prvků, byly posudky jednotlivých konstrukčních prvků posouzeny ručně v tabulkovém editoru MS Excel. Byly provedeny jednotkové posudky všech konstrukčních prvků dle vzorců:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.17)^{[4]}$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.18)^{[4]}$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.23)^{[4]}$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.24)^{[4]}$$

$\sigma$  - napětí v prvku od zatížení (c - tlak; t - tah; m - ohyb; 0 - rovnoběžně s vlákny; d - návrhová hodnota; y,z - směr působení)

$k_c$  - součinitel vzpěrnosti (dle kapitoly 6.3.2 vzorce (6.21) až (6.29) <sup>[4]</sup>)

$k_m$  - součinitel, který bere v úvahu redistribuci napětí a vliv nehomogenit materiálu v průřezu (pro obdélníkový průřez  $k_m = 0,7$ )

$f_d$  - pevnost materiálu v návrhové hodnotě

$$f_d = k_{\text{mod}} \cdot \frac{f_k}{\gamma_M} \quad (2.14)^{[4]}$$

Součinitel materiálu pro rostlé dřevo je  $\gamma_M=1,3$ . Most je vzhledem ke svému charakteru venkovní konstrukce zařazen do třídy použití 3. Modifikační součinitel se stanovuje podle zatížení s nejkratší dobou trvání a dle normy ČSN EN 1995-1-1<sup>[4]</sup> je uvažován hodnotou  $k_{\text{mod}}=0,70$ .

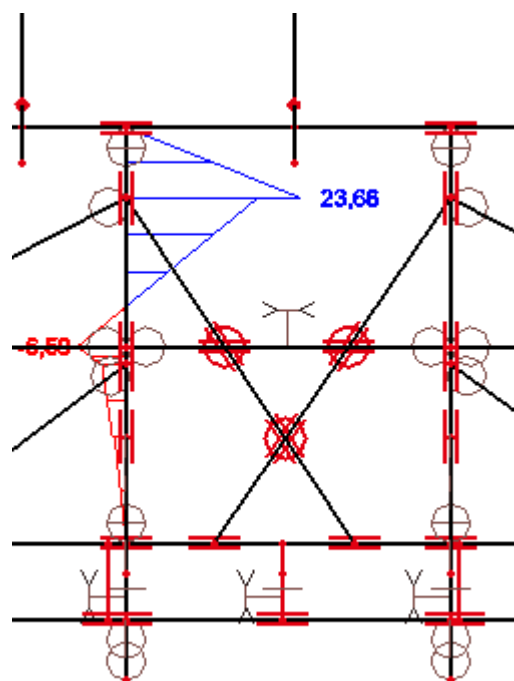
Celý postup výpočtu je uveden v příloze č. 4. V následující tabulce jsou uvedeny vnitřní síly, jednotkové posudky jednotlivých konstrukčních prvků a dále relativní deformace a limitní průhyby.

Jednotkové posudky						Deformace	
Prvek	N [kN]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]	Posudek	Rovnice	w [mm]	w <sub>lim</sub> [mm]
Krokev	7,70	2,08	0,01	<b>0,46</b>	(6.23)	9,30	9,00
Hambalek	2,06	0,02	0,01	<b>0,02</b>	(6.17)	0,00	5,59
Ondřejský kříž	8,43	1,56	0,01	<b>0,45</b>	(6.17)	5,00	7,71
Vaznice	76,35	7,53	0,94	<b>0,46</b>	(6.23)	4,20	21,33
Středová vaznice	102,30	3,21	0,35	<b>0,40</b>	(6.23)	2,40	23,17
Vzpěry	135,61	1,13	0,26	<b>0,95</b>	(6.24)	6,70	14,12
Sloup	80,79	23,39	3,3	<b>1,23</b>	(6.17)	8,10	7,90
Spodní pás příhrady	182,34	37,42	4,05	<b>0,81</b>	(6.17)	27,60	66,67
Hlavní trám	214,12	103,12	5,52	<b>0,85</b>	(6.23)	29,10	66,33
Podélníky	2,50	44,19	0,26	<b>0,59</b>	(6.23)	0,60	1,33
Podvleky	21,88	7,69	0,05	<b>0,80</b>	(6.17)	2,80	14,00
Vzpěrky	0,06	0,01	4,37	<b>0,44</b>	(6.18)	0,30	1,33

Tab 2. 4 Tabulka vnitřních sil a jednotkových posudků



Obr. 2. 45 Původní sloup a kovaný spoj sloupu a podvleku



Obr. 2. 46 Průběh momentu  $M_y$  od nelineární kombinace NC5 ve sloupu

Většina konstrukčních prvků bez problému vyhoví jak na mezní stav únosnosti, tak na mezní stav použitelnosti. Velmi nízké třídy pevnosti ve výpočtu vyrovnávají velké průřezy prvků. Jediným prvkem, který nevyhověl na mezní stav únosnosti, je sloup. Tento prvek byl při diagnostice zařazen do pevnostní třídy C14. Na první pohled se jedná o prvek původní, tedy cca 300 let starý, a dá se tedy předpokládat, že dřevo je degradováno pouze po povrchu a vnitřní část průřezu má mnohem lepší vlastnosti. Kritické místo se nachází v místě připojení vzpěry věšadla na sloup, vzpěra v místě připojení způsobuje značný ohybový moment. Při vizuální kontrole konstrukce však nejsou patrné známky poškození (praskliny, viditelné průhyby a vychýlení prvku) v místě připojení vzpěr. Proto je pravděpodobné, že prvek má ve skutečnosti mnohem lepší vlastnosti, než ty, které byly uvažovány pro výpočet.

V další tabulce jsou uvedeny pevnostní třídy jednotlivých prvků, jejich průřezy, délky, celkový objem řeziva a hmotnost konstrukce spočítaná za použití naměřených hodnot hustoty materiálu.

Výkaz materiálu						
Prvek	Materiál	b [m]	h [m]	l [m]	Počet [ks]	V [m <sup>3</sup> ]
Krokev	C24	0,16	0,12	2,70	48	2,49
Hambalek	C24	0,10	0,12	1,68	15	0,30
Ondřejský kříž	C24	0,10	0,14	2,31	18	0,58
Vaznice	C20	0,28	0,22	35,65	2	4,39
Středová vaznice	C14	0,28	0,22	30,75	2	3,79
Vzpěry	C14	0,20	0,20	48,76	2	3,90
Sloup	C14	0,24	0,30	2,37	22	3,75
Spodní pás příhrady	C14	0,38	0,40	34,40	2	10,46
Hlavní trám	C14	0,46	0,50	34,40	2	15,82
Podélníky	C14	0,46	0,46	34,40	7	50,07
Podvleky	D18	0,19	0,19	4,20	3	0,45
Vzpěrky	C14	0,20	0,20	0,99	44	1,74
<b>Celkový objem</b>						<b>97,76</b>
<b>Celková hmotnost [kg]</b>						<b>31501</b>

Tab 2. 5 Výkaz materiálu

## 2.6.2. Mezní stav použitelnosti

Pro mezní stav použitelnosti se posuzovaly relativní deformace jednotlivých prvků od charakteristické kombinace vytvořené pro nelineární výpočet. Limitní hodnotou posouzení byla  $1/300$  rozpětí  $L$  podle tabulky 7.2<sup>[4]</sup> pro hodnotu  $w_{inst}$ . Výsledné hodnoty bez dotvarování jsou uvedeny v Tab 2. 4. Celkový průhyb hlavního trámu je 21,90 mm, což vyhovuje limitnímu průhybu tohoto prvku, který je 66,33 mm.

## 2.7. Dynamický výpočet

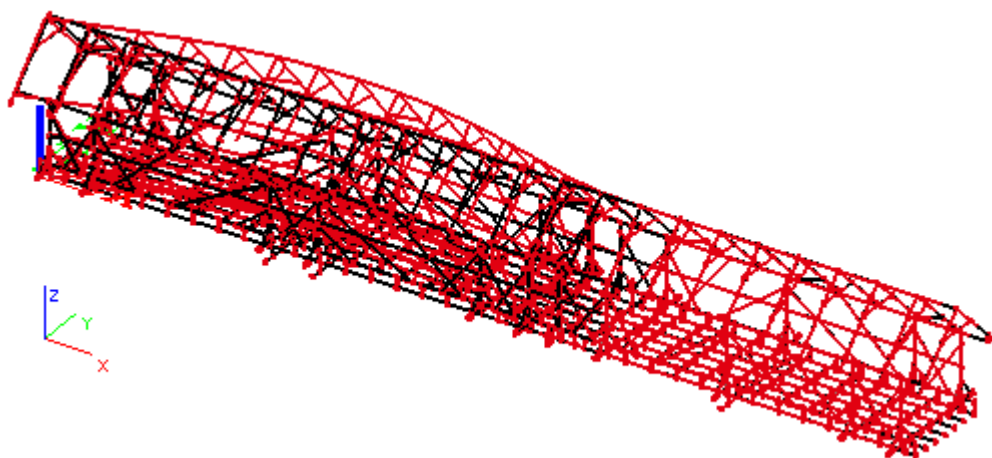
Součástí výpočtu lávek by měl být také dynamický výpočet. Obvykle se u lávek počítá zatížení konstrukce dynamickým větrem a vlastní frekvence. Dynamický vítr byl vzhledem k mohutnosti historické konstrukce zanedbán. Předpokládá se, že zatížení statickým větrem je dostatečné

bezpečné. Na konstrukci byly spočítány vlastní frekvence a ty byly porovnány s frekvencí lidské chůze, která se pohybuje v rozmezí 1,7-2,5 Hz.

N	f [Hz]	omega [1/sec]	omega^2 [1/sec^2]	T [sec]
*Studentská verze* *Studentská verze* *Studentská verze* *Studentská verze* *Studentská verze*				
Kombinace hmot : CM1				
1	4,27	26,84	720,31	0,23
2	6,25	39,24	1539,58	0,16
3	7,30	45,85	2102,58	0,14
4	7,83	49,20	2420,92	0,13

Tab 2. 6 Tabulka vlastních frekvencí konstrukce

První vlastní frekvence konstrukce je  $f=4,27$  Hz a je mnohem vyšší než frekvence lidské chůze proto v konstrukci nebude docházet k rezonanci při pohybu chodců a konstrukce je bezpečná.



Obr. 2. 47 Přemístění uzlů pro kombinaci hmot

## 2.8. Spoje

Jednou z nejdůležitějších součástí nejen dřevěných konstrukcí jsou spoje. V historické konstrukci se vyskytují převážně tesařské spoje. Nejvíce se vyskytuje přeplátování (Obr. 2. 26) a zapuštění (Obr. 2. 51), dále jsou to čepy (Obr. 2. 49) a osedlání (Obr. 2. 48). Většinu spojů v konstrukci není možné přesně posoudit, jelikož není známa jejich vnitřní geometrie.



Obr. 2. 48 Osedlání krokve na vaznici





Obr. 2. 50 Začepování sloupu do spodního pásu příhrady

Obr. 2. 49 Přeplátování vzpěry na sloup a přeplátování středové vaznice a vzpěry

Jako příklad výpočtu tesařského spoje bylo posouzeno jednoduché zapuštění vzpěry do spodního pásu příhrady. Hloubka zapuštění byla odhadnuta  $t_z=70$  mm. Působící síla v nejvíce namáhané vzpěře je  $N=135,61$  kN.



Obr. 2. 51 Zapuštění vzpěry do spodního pásu příhrady

Návrhová pevnost tlaku šikmo k vláknům  $f_{c,\alpha,d}=4,95$  MPa.

Návrhová hodnota tlakového napětí v šikmém čelním zapuštění

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{N_d \cdot \cos^2 \alpha}{b \cdot t_z} = \frac{135,61 \cdot 10^3 \cdot \cos^2 12,5^\circ}{380 \cdot 70} = 4,86 \text{ MPa} < 4,95 \text{ MPa}$$

Návrhová pevnost ve smyku  $f_{v,d}=1,45$  MPa.

Návrhová hodnota smykového napětí

$$\tau_{v,d} = \frac{N_d \cdot \cos \beta}{b \cdot l_z} = \frac{135,61 \cdot 10^3 \cdot \cos 25}{380 \cdot 250} = 1,29 \text{ MPa} < 1,45 \text{ MPa}$$

Jediným spojem s ocelovými spojovacími prostředky v konstrukci je připojení sloupu a podvleku pomocí kovaných třmenů a kolíků (Obr. 2. 45). Spoj byl posouzen dle normy ČSN EN 1995-1-1<sup>[4]</sup> kapitola 8. *Spoje s kovovými spojovacími prostředky*. Dle tloušťky třmene a vzájemné polohy třmene a dřevěného prvku byl spoj zařazen do kategorie dvoustřížný spoj s tenkou ocelovou deskou a posouzen dle vzorce pro charakteristickou únosnost svorníku  $F_{v,Rk}$  pro jeden stříh a jeden spojovací prostředek (8.12)(j) a (k).

Posuzovaná tahová síla ve sloupu přenášena svorníky do třmenů, a dále do podvleku je  $N_{Ed}=80,79 \text{ kN}$ .

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 0,5 \cdot f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \\ 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{cases} \quad (8.12)^{[4]}$$

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 0,5 \cdot 14,437 \cdot 240 \cdot 30 = 51,973 \text{ N} \\ 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot 748064 \cdot 14,437 \cdot 30} + \frac{12000}{4} = 32274 \text{ N} \end{cases}$$

Únosnost jednoho spojovacího prvku a jednoho stříhu:

$$F_{v,Rd} = k_{\text{mod}} \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_M} = 0,7 \cdot \frac{32274}{1,1} = 20538 \text{ N}$$

Celková únosnost spoje se dvěma dvoustřížnými spojovacími prostředky je  $F_{v,Rd}=82,153 \text{ kN}$ . Únosnost je větší než působící síla.



### 3. MODERNÍ KONSTRUKCE DŘEVĚNÝCH LÁVEK

V následující kapitole budou jako alternativa k současné lávce přes řeku Svratku uvedeny dvě varianty příhradového mostu. Inspirací pro vytvoření novodobé konstrukce se staly dvě lávky přes řeku Metuji na Náchodsku a to lávka Peklo a lávka Ostrovy. Tyto lávky mají rozpětí 24 metrů, šířku 2 metry a jsou zastřešeny sedlovou střechou.



Obr. 3. 1 Lávka Ostrovy

Zdroj: [8]



Obr. 3. 2 Lávka Peklo

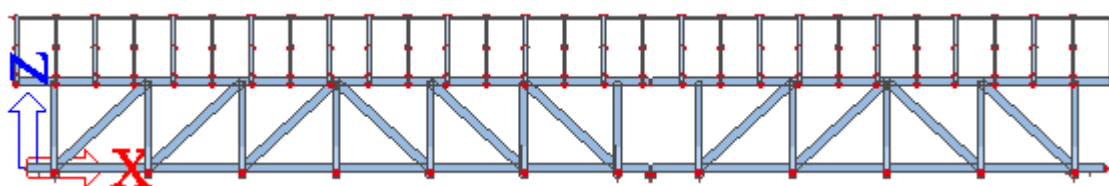
Zdroj [9]

U nových konstrukcí byla snaha zachovat co nejvěrněji rozměry původní lávky. Osová vzdálenost mezi sloupky je 3,55 m, světlá výška 4,42 m. Sklon střešní konstrukce je 45°. Vzdálenost krokví je 1,25m. Nosná konstrukce je zhotovena z lepeného lamelového dřeva pevnostní třídy GL24h, konstrukce krovu pak z rostlého dřeva pevnosti C24.

#### 3.1. Popis konstrukce

##### Varianta A

První varianta je příhradová konstrukce s pouze tlačеныmi vzpěrami průřezu 200/260 mm. Hlavní trámy a podélníky jsou uloženy prostě ve dvou polích, jsou shodného průřezu 200/260 mm a jsou od sebe osově vzdáleny 710 mm. Mostovka je tvořena fošnami tloušťky 50 mm uloženými v příčném směru na podélníky, fošny jsou připojeny hřebíky k nosné konstrukci. Sloupy průřezu 220/200 mm mají konstantní vzdálenost 3 m s výjimkou sloupů nad středním pilířem, kde je vzdálenost 2,6 m. Příčné prvky průřezu 240/240 mm (u historického mostu nazývané podvleky) jsou umístěny pod podélníky a vzpěrky sloupů průřezu 200/200 mm jsou umístěny u každého sloupu a jsou zapuštěny do příčného prvku a sloupu. Vaznice průřezu 200/220 mm je montážně rozdělena na prvky délek cca 6 m. Střešní konstrukce je tvořena krokvi průřezu 100/140 mm vzdálenými od sebe 1,25m. Krokve jsou v polovině své délky spojeny kleštinami, které jsou tvořeny dvěma obdélníky průřezu 40/100 mm.

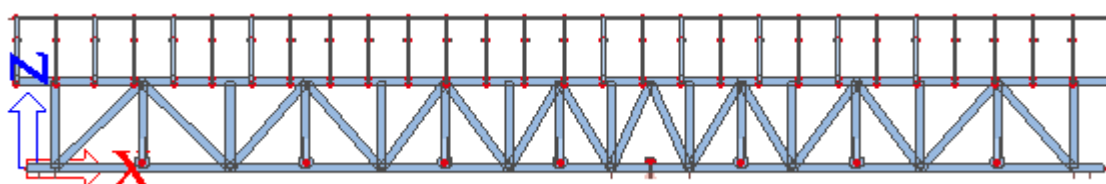


Obr. 3. 3 Model příhradové konstrukce – Varianta A

Uložení obou variant se předpokládá stejně jako u původního mostu prostřednictvím pozednic na krajní opěry a zděný pilíř.

### Varianta B

Druhá varianta je tvořena příhradovou konstrukcí tvořenou tlačnými i taženými diagonálami. Pole je vždy tvořeno jednou tlačnou a jednou taženou diagonálou, velikost pole se směrem od středního pilíře zvětšuje o 0,39 m v západním poli a o 0,40 m v poli východním. Diagonály byly předběžně navrženy profilu 240/220 mm stejně jako sloupy. Hlavní trámy a podélníky byly navrženy jako prosté nosníky průřezu 240/280 mm a vzdálenosti 710 mm. Příčné prvky jsou v této variantě umístěny nad podélníky. V místech, kde se u paty sloupu napojují diagonály je příčný trám tvořen jedním obdélníkovým profilem 240/240 mm umístěným mezi sloupy. Do tohoto příčného trámu je zapuštěna ke každému sloupu pouze vnitřní vzpěrka průřezu 200/200 mm. U sloupů, kde nedochází k napojení diagonál ve spodní části sloupu je příčný trám tvořen dvěma obdélníkovými profily průřezu 120/240 mm. Tyto prvky jsou protaženy za obrys konstrukce a jsou do nich z obou stran sloupu upevněny vzpěrky dvoustřížným spojem s kovovým spojovacím prostředkem. Vaznice je zde navržena průřezu 220/260 mm a je montážně rozdělena na prvky délek cca 6 m. Konstrukce zastřešení je tvořena stejnými prvky jako ve variantě A.



Obr. 3. 4 Model příhradové konstrukce – Varianta B

### 3.2. Zatížení

Zatížení konstrukce bylo spočítáno i aplikováno stejně jako u konstrukce původní. Na konstrukci se tedy počítá s vlastní tíhou, ostatním stálým zatížením, zatížením chodce a klimatickým zatížením, které jsou dány následujícími charakteristickými hodnotami:

Vlastní tíha	generováno programem
Ostatní stálé zatížení	$g_1=0,30 \text{ kN/m}^2$
Nahodilé zatížení	$q_1=5 \text{ kN/m}^2$
Sníh	$s_k=0,8 \text{ kN/m}^2$ (včetně součinitele tvaru střechy)
Vítr	$q_p=0,594 \text{ kN/m}^2$ (bez součinitele vnějšího tlaku)

Uvažováno bylo 10 zatěžovacích stavů, ze kterých byla vytvořena nelineární kombinace pro mezní stavy únosnosti i použitelnosti odpovídající nejnepříznivějším nelineárním kombinacím u původního mostu.

Kombinace jednotlivých zatěžovacích stavů jsou provedeny dle normy ČSN EN 1990<sup>[5]</sup>:

$$\text{MSÚ} \quad 6.10.a \quad \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$$6.10.b \quad \sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$$\text{MSP} \quad 6.14.b \quad \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Jméno	Typ	Zatěžovací stavy	Souč. [-]
<i>*Studentská verze* *Studentská verze* *Studentská verze* *Studentská verze* *Studentská verze* *St</i>			
NC1	Únosnost	LC1 - vlastní tíha	1,15
		LC2 - ostatní stave	1,15
		LC3 - chodci	1,50
		LC6 - sníh levý	0,75
		LC8 - vítr - tlak zleva saní zprava	0,90
NC2	Použitelnost	LC1 - vlastní tíha	1,00
		LC2 - ostatní stave	1,00
		LC3 - chodci	1,00
		LC6 - sníh levý	0,50
		LC8 - vítr - tlak zleva saní zprava	0,60

Tab. 3. 1 Nelineární kombinace zatížení

### 3.3. Výpočtový model

Obě varianty byly modelovány jako prostorové prutové konstrukce. Snahou bylo vytvořit konstrukce lehké, s menším počtem konstrukčních prvků, které tvoří kontrast k historickému pojetí dřevěné lávky. Spojení konstrukčních prvků jsou modelovány klouby.

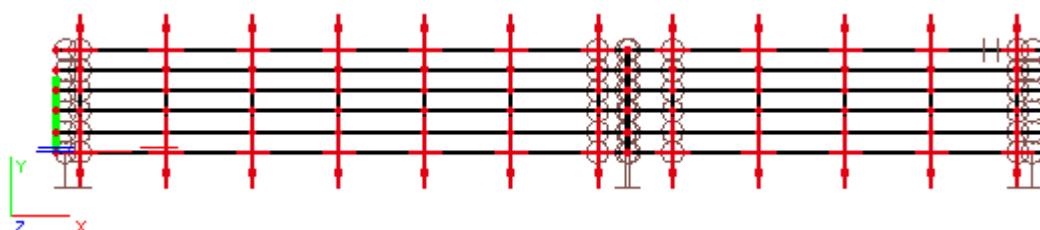
#### Varianta A

Hlavní trámy a podélníky jsou tvořeny prvky stejného profilu, jejich spolupůsobení je zabezpečeno příčnými prvky umístěnými pod úroveň podélníků. Podélníky a podvleky jsou vzájemně spojeny tuhými rameny. Řídící uzel tuhého ramene byl modelován v ose podélníku, uzel závislý v ose podvleku. Počítá se s připojením těchto prvků pomocí svorníků.



Obr. 3. 5 Napojení podvleků a podélníků pomocí tuhých ramen

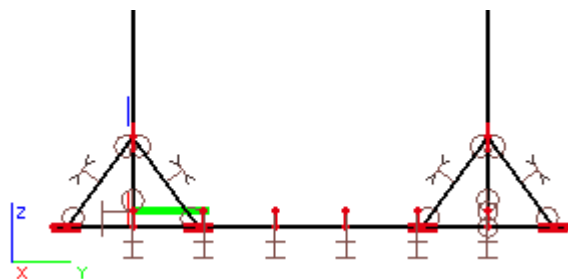
Mosty v těchto variantách nebyly modelovány, protože spolupůsobení podélníků je již zajištěno podvleky. Uložení bylo modelováno bodovými podporami na prutu, ty zastupují pozednice, prostřednictvím kterých je konstrukce uložena.



Obr. 3. 6 Schéma podepření konstrukce a vzájemného uspořádání podélníků a příčných prvků – varianta A

Sloupy mají v poli konstantní vzdálenost 3 m, nad podporou je vzdálenost 2,6 m. Ve spodní části jsou v příčném směru podepírány vzpěrkami, které jsou ke sloupu, i podvleku připojeny

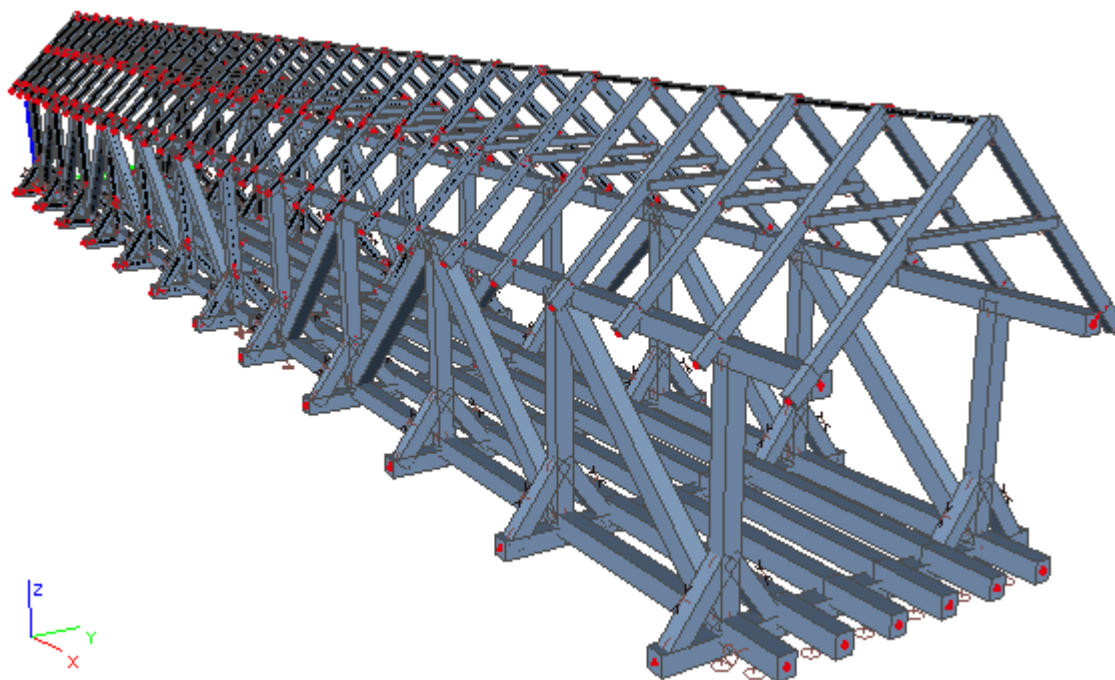
tesařskými spoji. Z toho důvodu byly do výpočtu opět zavedeny konstrukční nelinearity a vzpěrky byly vyloučeny z tahového namáhání.



Obr. 3. 7 Vzpěrky – kloubové uložení a vyloučení z tahového namáhání

U diagonál se předpokládá připojení k hlavnímu trámu a vaznici pomocí vnitřních plechů a svorníků. Tento spoj je modelován kloubem. Diagonály mají jednotnou délku 4,07 m.

Vaznice je modelována prutem rozděleným na části délek cca 6 m především kvůli dopravě a montáži. Jednotlivé montážní spoje jsou modelovány kloubem. Spojení krokve a vaznice je tvořeno osedláním zhruba do čtvrtiny průřezu krokve a hřebem z horní strany krokve. Tento spoj je modelován tuhým ramenem s řídicím uzlem v ose vaznice a závislým uzlem v ose krokve. Kloubové spojení je modelováno kloubem na závislém uzlu tuhého ramene. Konstrukce krovu je v příčném směru ztužena kleštinami tvořenými průřezem složeným ze dvou obdélníků. Kleštiny jsou ke krokvím připojeny v polovině délky krokve.

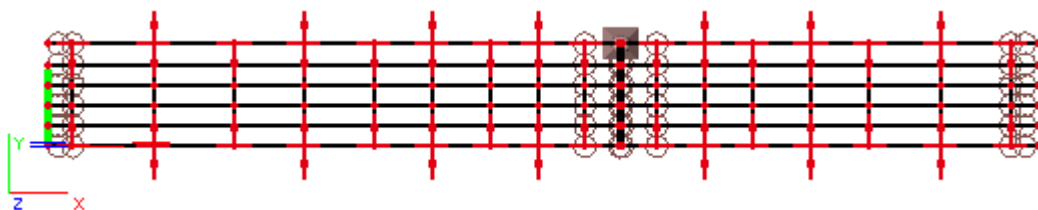


Obr. 3. 8 Model mostu – Varianta A

#### Varianta B

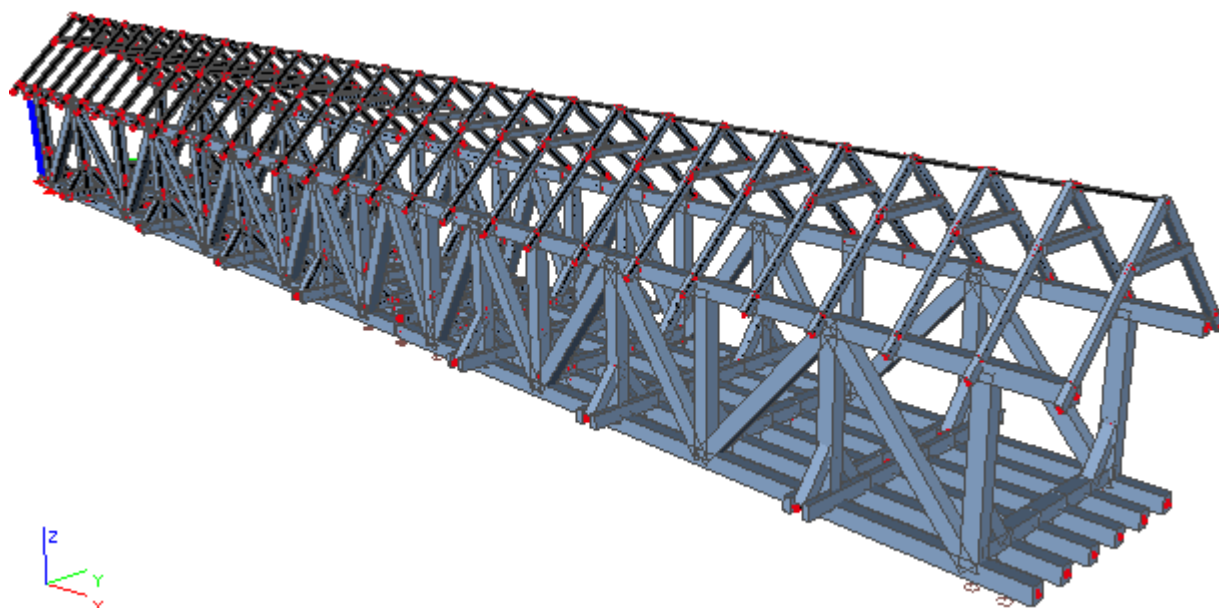
Ve spodní části konstrukce se druhá varianta liší především ve způsobu modelování příčných prvků, které jsou umístěny nad hlavními trámy a podélníky. Upevnění příčných prvků k podélníkům se předpokládá přiloženými úhelníky a vruty. Spojení příčných a podélních prvků je opět modelováno

pomocí tuhých ramen, řídicí uzel byl umístěn v ose podélníku a uzel závislý v ose příčného prvku. Vzpěrky sloupů jsou zde opět vyloučeny z tahového namáhání.



Obr. 3. 9 Schéma podepření konstrukce a vzájemného uspořádání podélníků a příčných prvků – varianta B

V konstrukci krovu je oproti variantě A změna v umístění kleštín. Ty jsou ke krokům připojeny ve svislé vzdálenosti 0,707 m od vrcholu kroků.



Obr. 3. 10 Model mostu – Varianta B

### 3.4. Posouzení

#### 3.4.1. Mezní stav únosnosti

Posouzení na mezní stav únosnosti bylo provedeno v tabulkovém editoru MS Excel na základě vnitřních sil získaných z výpočetního programu SCIA Engineer. Jednotkové posudky byly provedeny dle normy ČSN EN 1995-1-1<sup>[4]</sup> (kapitola 6) a následujících vzorců:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.17)^{[4]}$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.18)^{[4]}$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.23)^{[4]}$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.24)^{[4]}$$



$\sigma$  - napětí v prvku od zatížení (c - tlak; t - tah; m - ohyb; 0 - rovnoběžně s vlákny; d - návrhová hodnota; y,z - směr působení)

$k_c$  - součinitel vzpěrnosti (dle kapitoly 6.3.2 vzorce (6.21) až (6.29) <sup>[4]</sup>)

$k_m$  - součinitel, který bere v úvahu redistribuci napětí a vliv nehomogenit materiálu v průřezu (pro obdélníkový průřez  $k_m = 0,7$ )

$f_d$  - pevnost materiálu v návrhové hodnotě

$$f_d = k_{mod} \cdot \frac{f_k}{\gamma_M} \quad (2.14) \quad [4]$$

Součinitel materiálu pro lepené lamelové dřevo je  $\gamma_M=1,25$ . Most je zařazen do třídy použití 3. Modifikační součinitel je uvažován hodnotou  $k_{mod}=0,70$ .

Postupy výpočtu jsou uvedeny v příloze č. 10. a příloze č. 15. Následující tabulky obsahují vnitřní síly, jednotkové posudky jednotlivých konstrukčních prvků a dále relativní deformace a limitní průhyby.

#### Varianta A

Jednotkové posudky						Deformace	
Prvek	N [kN]	$M_y$ [kNm]	$M_z$ [kNm]	Posudek	Rovnice	w [mm]	$w_{lim}$ [mm]
Krokev	2,19	2,11	0,02	<b>0,52</b>	(6.23)	8,30	8,92
Kleština	4,12	0,01	0	<b>0,11</b>	(6.24)	0,10	6,31
Vaznice	200,40	2,40	2,47	<b>0,60</b>	(6.23)	3,80	20,00
Vzpěry	160,06	0,00	9,1	<b>0,97</b>	(6.24)	2,60	13,57
Sloupy	105,27	0,67	11,32	<b>0,80</b>	(6.18)	9,10	9,17
Hl. trámy a podélníky	21,69	13,90	11,55	<b>0,86</b>	(6.18)	16,20	66,33
Podvlek	4,79	25,23	5,51	<b>0,95</b>	(6.17)	3,20	17,17
Vzpěrky	0,08	0,00	4,57	<b>0,26</b>	(6.24)	0,00	1,33

Tab. 3. 2 Jednotkové posudky a relativní deformace – Varianta A

Všechny navržené prvky vyhověly na mezní stav únosnosti i použitelnosti.

#### Varianta B

Jednotkové posudky						Deformace	
Prvek	N [kN]	$M_y$ [kNm]	$M_z$ [kNm]	Posudek	Rovnice	w [mm]	$w_{lim}$ [mm]
Krokev	3,47	1,48	0,01	<b>0,47</b>	(6.23)	6,20	8,92
Kleština	4,03	0,01	0,01	<b>0,08</b>	(6.23)	0,00	4,71
Vaznice	199,50	1,78	7,04	<b>0,87</b>	(6.24)	2,30	17,43
Vzpěry	140,88	0,21	3,38	<b>0,46</b>	(6.24)	7,70	13,11
Sloup	93,04	1,98	35,86	<b>1,04</b>	(6.18)	9,10	9,17
Hl. trámy a podélníky	19,77	33,06	9,13	<b>0,99</b>	(6.17)	17,60	66,33
Podvlek	12,72	36,15	1,45	<b>1,22</b>	(6.17)	4,90	17,17
Vzpěrky	0,07	0,00	3,6	<b>0,20</b>	(6.24)	6,30	3,21

Tab. 3. 3 Jednotkové posudky a relativní deformace – Varianta B

Některé konstrukční prvky jako sloupy a podvleky nelze v tomto konstrukčním uspořádání na mezní stav únosnosti ekonomicky nadimenzovat. Vzpěrky sloupů nevyhoví na mezní stav použitelnosti. Právě vzpěrky umístěny v této variantě oboustranně pouze u každého druhého sloupu jsou patrně příčinou velkých namáhání ve sloupech.

V následujících tabulkách jsou pro přehlednost uvedeny jednotlivé konstrukční prvky a jejich rozměry a počet kusů. Pro možnost srovnání jsou v tabulce uvedeny objemy řeziva jednotlivých prvků, celkový objem řeziva v konstrukci (bez prořezů pro tesařské spoje) a hmotnost konstrukce.

Výkaz materiálu						
Prvek	Materiál	b [m]	h [m]	l [m]	Počet [ks]	V [m <sup>3</sup> ]
Krokev	C24	0,10	0,14	2,68	29	1,09
Kleština	C24	0,08	0,10	1,89	29	0,44
Vaznice	GL24h	0,20	0,22	35,00	2	3,08
Vzpěry	GL24h	0,26	0,20	46,78	2	4,87
Sloupy	GL24h	0,22	0,20	2,75	24	2,90
Hl. trámy a podélníky	GL24h	0,20	0,26	34,40	14	25,04
Podvlek	GL24h	0,24	0,24	5,15	8	2,37
Vzpěrky	GL24h	0,20	0,20	1,12	48	2,14
<b>Celkový objem</b>						<b>41,93</b>
<b>Celková hmotnost [kg]</b>						<b>15889</b>

Tab. 3. 4 Výkaz materiálu – Varianta A

Výkaz materiálu						
Prvek	Materiál	b [m]	h [m]	l [m]	Počet [ks]	V [m <sup>3</sup> ]
Krokev	C24	0,08	0,14	2,68	29	0,87
Kleština	C24	0,08	0,10	1,41	29	0,33
Vaznice	GL24h	0,22	0,26	35,00	2	4,00
Vzpěry	GL24h	0,24	0,22	39,92	2	4,22
Sloup	GL24h	0,28	0,24	2,75	32	5,91
Hl. trámy a podélníky	GL24h	0,24	0,28	34,40	14	32,36
Podvlek	GL24h	0,24	0,24	5,15	18	5,34
Vzpěrky	GL24h	0,20	0,20	1,12	46	2,05
<b>Celkový objem</b>						<b>55,09</b>
<b>Celková hmotnost [kg]</b>						<b>19281</b>

Tab. 3. 5 Výkaz materiálu – Varianta B

### 3.4.2. Mezní stav použitelnosti

Pro mezní stav použitelnosti byly posouzeny relativní deformace jednotlivých prvků od charakteristické kombinace vytvořené pro nelineární výpočet. Limitní hodnotou posouzení byla  $1/300$  rozpětí  $L$  podle tabulky 7.2<sup>[4]</sup> pro hodnotu  $w_{inst}$ . Výsledné hodnoty bez vlivu dotvarování jsou uvedeny v Tab. 3. 2 a Tab. 3. 3.

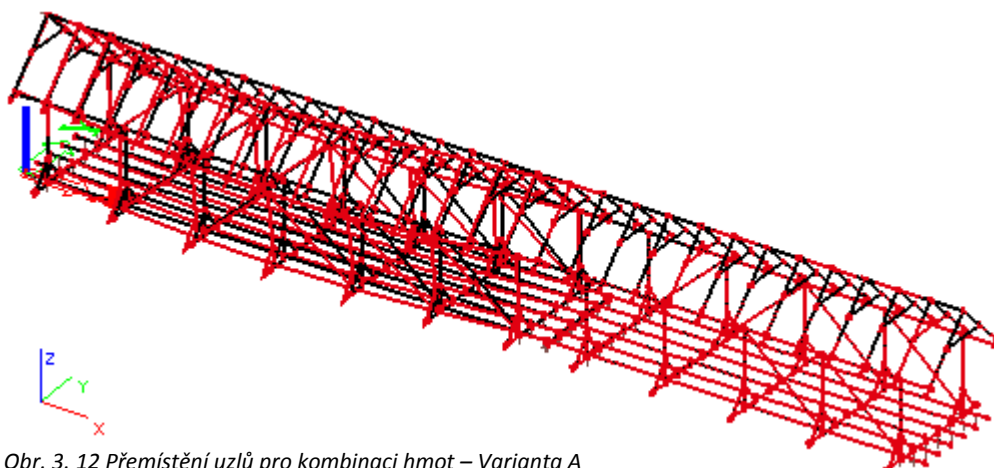
Celkový průhyb hlavního trámu u varianty A je 16,2 mm a u varianty B je 17,6 mm, tyto hodnoty vyhoví mezní deformaci  $w_{lim}=66,33$  mm.

### 3.5. Dynamický výpočet

U konstrukcí lávek pro pěší by měla být zohledněna také únosnost při dynamickém namáhání konstrukce. Přesto, že se jedná o konstrukce podstatně subtilnější než původní lávka, jsou stále dostatečně mohutné pro zanedbání výpočtu dynamického větru. Pro obě varianty byla provedena modální analýza pro zjištění vlastních frekvencí konstrukcí. Výsledné hodnoty byly porovnány s frekvencí lidské chůze, která se pohybuje v rozmezí 1,7 – 2,5 Hz.

N	f [Hz]	omega [1/sec]	omega^2 [1/sec^2]	T [sec]
*Studentská verze* *Studentská verze* *Studentská verze* *Studentská verze* *Studentská verze* *S				
Kombinace hmot : CM1				
1	4,15	26,10	681,19	0,24
2	5,81	36,51	1332,79	0,17
3	7,47	46,94	2203,70	0,13
4	8,61	54,08	2924,85	0,12

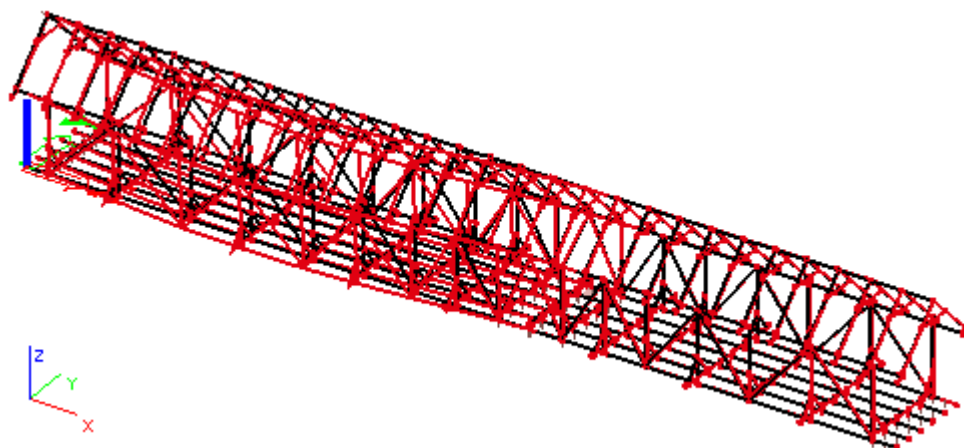
Tab. 3. 6 Vlastní frekvence – Varianta A



Obr. 3. 12 Přemístění uzlů pro kombinaci hmot – Varianta A

N	f [Hz]	omega [1/sec]	omega^2 [1/sec^2]	T [sec]
*Studentská verze* *Studentská verze* *Studentská verze* *Studentská verze* *Studentská verze* *Stu				
Kombinace hmot : CM1				
1	4,94	31,06	964,69	0,20
2	7,15	44,90	2016,36	0,14
3	8,99	56,47	3188,57	0,11
4	10,91	68,57	4702,20	0,09

Tab. 3. 7 Vlastní frekvence – Varianta B



Obr. 3. 11 Přemístění uzlů pro kombinaci hmot – Varianta B



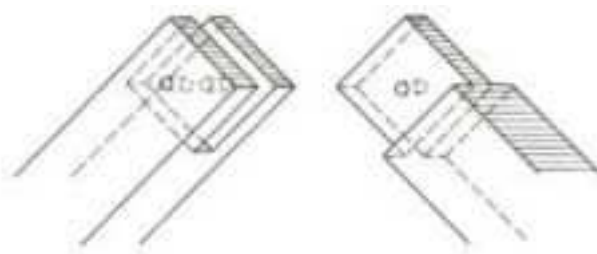
Vlastní frekvence  $f_A=4,15$  Hz a  $f_B=4,94$  Hz jsou obě mnohem vyšší než průměrná frekvence lidské chůze a proto při pohybu chodců po konstrukci nebude docházet k rezonanci a konstrukce je pro pěší bezpečná.

### 3.6. Spoje

U moderních konstrukcí není nutné provádět spoje jednotlivých prvků pouze tesařsky a s výhodou můžeme využít moderních spojů s kovovými spojovacími prostředky.

#### Spojení krokví ve vrcholu krovu

Spojení krokví ve vrcholu krovu bez vrcholové vaznice je realizováno částečně tesařským spojem – přeplátováním a částečně svorníkem například dvojstřížně způsobem uvedeným na Obr. 3. 13 nebo jednostřížně s přeplátováním do poloviny šířky průřezu krokve.



Obr. 3. 13 Příklad dvojstřížného spoje

Pro tuto konstrukci byl zvolen jednostřížný spoj se svorníkem průměru  $d=14$  mm. Působící síla ve spoji je  $F_{Ed}=2,19$  kN a únosnost jednostřížného spoje je  $F_{Rd}=3,33$  kN.

Aplikaci v tabulkovém editoru MS Excel pro výpočet spojů s kovovými spojovacími prostředky poskytl vedoucí práce.

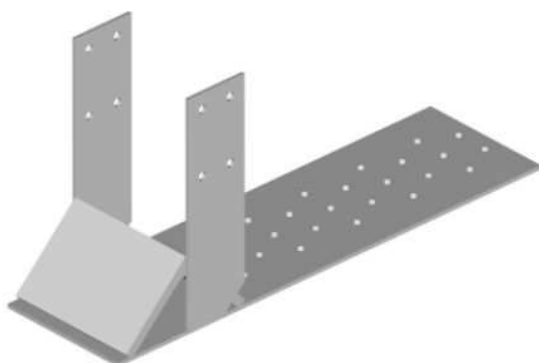
#### Připojení kleštín a krokví

Připojení kleštín na krokve je realizováno dvoustřížným spojem se svorníkem. Kleština tvořena dvěma obdélníkovými profily se přiloží po stranách krokve a spojí se svorníkem. Svorník byl zvolen průměru  $d=14$  mm, síla v kleštině je  $F_{Ed}=4,12$  kN a únosnost spoje  $F_{Rd}=5,32$  kN.

#### Napojení krokve na vaznici

Napojení krokví na vaznici lze provést tradičně osedláním a zajištěním hřebíkem z horní strany krokve nebo například kotvou krokve BV/KK 12-20 firmy Bova. „*Statická kotva krokve s otvory, vyrobená z ocelového plechu jakosti S235JR (pozinkováno).*“ „*Kotva krokve se používá ke kotvení krokví k pozednicím či jiným dřevěným prvkům, jako spojovací materiál slouží kroužkové (konvexní) hřebíky pr.4mm.*“<sup>[10]</sup>.

V tomto případě je využito tradičního způsobu spojení tedy osedlání a hřebíku.

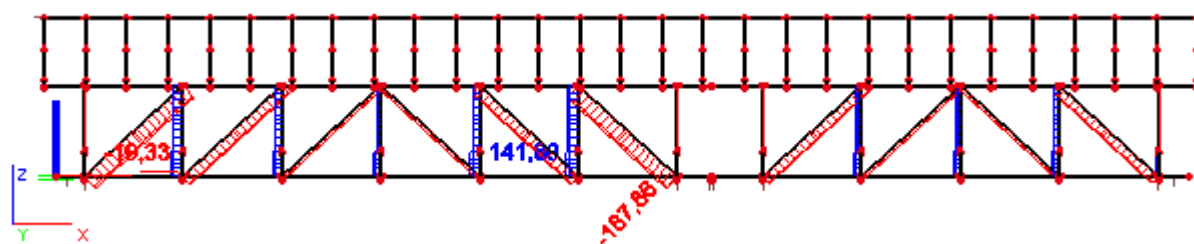


Obr. 3. 14 Kotva krokve BV/KK 12-20

### Spojení sloupů a vzpěr s vaznicí a hlavním trámem

Moderním způsobem, který je jak estetický tak velmi výhodný, je připojování sloupů a vzpěr k vaznicím a hlavním trámům pomocí vnitřních ocelových desek a svorníků.

Pro připojení sloupů a diagonál na hlavní trám případně vaznici byl spočítán přípoj s vnitřními ocelovými plechy tloušťky  $t=5\text{ mm}$ . Největší normálová síly ve sloupu je  $N_t=141,6\text{ kN}$  a v diagonále  $N_c=187,76\text{ kN}$ .



Obr. 3. 15 Průběh normálových sil

Pro přenesení tahové síly ve sloupu byl navržen spoj s dvanácti čtyřstržnými svorníky ve třech řadách průměru  $d=8\text{ mm}$  a pro připojení tlačené diagonály patnáct čtyřstržných svorníků ve třech řadách průměru  $d=8\text{ mm}$ . Výpočet je uveden v příloze č. 11.

### Další spoje

Spojení podvelků a podélníků bylo navrženo prostřednictvím závitových tyčí s podložkami a maticemi. Připojení vzpěrek sloupů k podvelkům a sloupům je uvažováno tesařským spojem – zapuštěním.

## 4. ZÁVĚR

Historický most v obci Černvín na Vysočině je bezesporu výjimečnou stavbou. Postupnou iterací byl nalezen výstižný výpočetní model. Byly posouzeny únosnosti všech prvků a rozhodujícího spoje. Ačkoli vyhodnocením diagnostického průzkumu byly získány velmi nízké hodnoty pevností (průměrně C14), konstrukce díky poměrně velkým průřezům konstrukčních prvků vyhoví jak na mezní stav únosnosti, tak na mezní stav použitelnosti. Výjimku pro mezní stav únosnosti tvoří sloup v místě připojení vzpěry, která je součástí věšadla. Konstrukce však v daném místě nevykazuje viditelné známky poškození velkým namáháním. Tento výsledek je pravděpodobně zapříčiněn nízkou třídou pevnosti zadanou do výpočtu. Dle vizuálního zhodnocení se jedná o původní sloup a měření povrchovou metodou může být zkreslené, protože prvek vykazuje jiné vlastnosti na povrchu, který je stále vystaven vlivu prostředí, než uvnitř průřezu. Pro mezní stav použitelnosti překračuje limitní hodnoty sloup a krokve. U sloupu byly příčiny již zmíněny, u krokve jde o překročení limitní hodnoty o  $0,3\text{ mm}$  a příčinou je pravděpodobně velká vzdálenost krokví  $1,55\text{ m}$ . S menší vzdáleností krokví deformace výrazně klesají. V programu SCIA Engineer byla také provedena modální analýza pro zjištění vlastních frekvencí konstrukce. První vlastní frekvence je  $f=4,27\text{ Hz}$ , která se liší od frekvence lidské chůze a konstrukce je tedy pro pohyb chodců bezpečná. V závěru této kapitoly byl spočítán spoj, který zajišťuje přenesení tahové síly ve sloupech do podvleků, resp. do hlavních trámů a podélníků. Spoj se skládá z masivního kovaného třmenu a dvou svorníků průměru cca  $30\text{ mm}$  a i s uvažováním nereálně nízké pevnosti dřeva z měření tento spoj vyhoví.

V další části práce byly navrženy a posouzeny alternativní varianty konstrukce mostu. Ze statického výpočtu obou alternativních variant a následného porovnání vyplývá, že varianta A je funkční systém, který je v dnešní době vhodné použít v praxi. Varianta B, u které hrálo větší roli architektonické pojetí, vhodná není. Jednotlivé prvky jako sloupy, podélníky a podvleky v tomto konstrukčním uspořádání nelze efektivně nadimenzovat. Dalšími výhodami Varianty A je menší objem řeziva a menší počet konstrukčních prvků, tzn. méně spojů.

Srovnáme-li navrženou moderní konstrukci (Varianta A) a historickou konstrukci mostu v Černvíru, lze dojít k závěru, že moderní výpočetní metody a návrhové přístupy s sebou nesou výhody zejména efektivnějšího využití materiálu. Pro přenesení stejného zatížení je v případě moderní konstrukce zapotřebí zhruba polovičního objemu řeziva než v případě historické konstrukce.

## 5. ZDROJE

---

- [1] Černvír. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-10-30]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cernv%C3%ADr>
- [2] KUKLÍK, Petr. *Dřevěné konstrukce*. 1. vyd. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2005, 171 s. ISBN 80-867-6972-0.
- [3] EN 1991-1-1-4 Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem
- [4] EN 1995-1-1: Navrhování dřevěných konstrukcí, Část 1-1: Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
- [5] EN 1990: Zásady navrhování konstrukcí.
- [6] ČSN EN 338: Konstrukční dřevo - Třídy pevnosti
- [7] ČSN 73 1702: Navrhování, výpočet a posuzování dřevěných stavebních konstrukcí – Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby
- [8] HORÁKOVÁ, Marie a Lubomír KRULIŠ. Nové město nad Metují [online]. [cit. 2013-12-18]. Dostupné z: <http://www.novemestonm.cz/pro-turisty/turisticka-atraktivita/lavky-pres-reku-metuji.html>
- [9] IDNES.CZ a Martin JANOŠKA. Cestování iDNES.cz. [online]. [cit. 2013-12-18]. Dostupné z: [http://cestovani.idnes.cz/peklo-ktere-si-zamilujete-vylet-do-kanonu-metuje-f6s-/tipy-na-vylet.aspx?c=A090128\\_165157\\_igcechy\\_tom](http://cestovani.idnes.cz/peklo-ktere-si-zamilujete-vylet-do-kanonu-metuje-f6s-/tipy-na-vylet.aspx?c=A090128_165157_igcechy_tom)
- [10] BOVA BŘEZNICE SPOL. S R.O. <http://www.bova-nail.cz/> [online]. [cit. 2014-01-04]. Dostupné z: [http://www.bova-nail.cz/kotva-krokve-bv-kk-%C2%A0-1220-130\\_100008\\_100084](http://www.bova-nail.cz/kotva-krokve-bv-kk-%C2%A0-1220-130_100008_100084)

## 6. SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA Č.1 - STATICKÝ POSUDEK A VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE Z ROKU 2006 .....	38
PŘÍLOHA Č.2 - DŘEVĚNÝ KRYTÝ MOST V OBCI ČERNVÍR - ZATÍŽENÍ .....	46
PŘÍLOHA Č.3 - DŘEVĚNÝ KRYTÝ MOST V OBCI ČERNVÍR - DIAGNOSTIKA .....	49
PŘÍLOHA Č.4 - DŘEVĚNÝ KRYTÝ MOST V OBCI ČERNVÍR - POSOUZENÍ.....	51
PŘÍLOHA Č.5 - DŘEVĚNÝ KRYTÝ MOST V OBCI ČERNVÍR - SPOJE.....	79
PŘÍLOHA Č.6 - HISTORICKÝ MOST - SCHÉMA PŮDORYSU A ŘEZU A-A' .....	81
PŘÍLOHA Č.7 - HISTORICKÝ MOST - ŘEZY B-B' A C-C' .....	82
PŘÍLOHA Č.8 - HISTORICKÝ MOST – VÝPOČTOVÝ MODEL.....	83
PŘÍLOHA Č.9 - VARIANTY - ZATÍŽENÍ .....	84
PŘÍLOHA Č.10 - VARIANTA A - POSOUZENÍ .....	87
PŘÍLOHA Č.11 - VARIANTA A - SPOJE.....	99
PŘÍLOHA Č.12 - VARIANTA A - SCHÉMA PŮDORYSU A ŘEZU A-A' .....	105
PŘÍLOHA Č.13 - VARIANTA A - SCHÉMA PŘÍČNÉHO ŘEZU .....	106
PŘÍLOHA Č.14 - VARIANTA A - VÝPOČTOVÝ MODEL .....	107
PŘÍLOHA Č.15 - VARIANTA B - POSOUZENÍ.....	108
PŘÍLOHA Č.16 - VARIANTA B - SCHÉMA PŮDORYSU A ŘEZU A-A' .....	121
PŘÍLOHA Č.17 - VARIANTA B - SCHÉMA PŘÍČNÉHO ŘEZU .....	122
PŘÍLOHA Č.18 - VARIANTA B - VÝPOČTOVÝ MODEL .....	123